ISSN 2658-6649 (Print)
ISSN 2658-6657 (Online)

Siberian journal of Life Sciences and Agriculture

SjLSA

www.discover-journal.ru



Volume 17, Number 4
2025

ISSN 2658-6649 (print)
ISSN 2658-6657 (online)

Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture

Volume 17, Number 4
2025

Главный редактор:
Солдатов Сергей Константинович, доктор медицинских наук, профессор (Центральный научно-исследовательский институт Военно-воздушных сил Министерства обороны Российской Федерации, Москва, Россия)

Заместители главного редактора:
Медведев Леонид Нестерович, доктор биологических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» (Красноярск, Россия)

Оказова Зарина Петровна, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, ФГБОУ ВО «Чеченский государственный педагогический университет» (Грозный, Россия)

Москаленко Ольга Леонидовна, кандидат биологических наук, НИИ МПС, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» (Красноярск, Россия)

Красноярск 2025

12+

Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture

Научно-практический рецензируемый журнал
Peer-reviewed scientific-practical journal

Периодичность. 6 номеров в год / Periodicity. 6 issues per year

Том 17, № 4, 2025 / Vol. 17, No 4, 2025

Учредитель и издатель:
ООО Научно-инновационный центр

Журнал основан в 2008 году
Зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций
Регистрационный номер:
серия ЭЛ № ФС 77-89425 от 20.05.2025 г.

Журнал входит в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, выпускаемых в РФ, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук.

Индексирование и реферирование:
Scopus
РИНЦ
Ulrich's Periodicals Directory
Cyberleninka
Google Scholar
ВИНИТИ РАН
DOAJ
BASE
EBSCO
WorldCat
OpenAIRE
ЭБС IPRbooks
ЭБС Znanium
ЭБС Лань

Адрес редакции, издателя и для корреспонденции:
Россия, 660127, Красноярский край, г. Красноярск, ул. 9 Мая, 5 к. 192
E-mail: editor@discover-journal.ru
http://discover-journal.ru/

+7 (995) 080-90-42

Founder and publisher:
Science and Innovation Center Publishing House

Founded 2008
Mass media registration certificate EL № FS 77 - 89425, issued May 20, 2025.

Journal is included in the List of leading peer-reviewed scientific journals and publications issued in the Russian Federation, which should publish main scientific results of doctor's and candidate's theses.

Indexing and Abstracting:
Scopus
RSCI
Ulrich's Periodicals Directory
Cyberleninka
Google Scholar
VINITI Database RAS
DOAJ
BASE
EBSCO
WorldCat
OpenAIRE
IPRbooks
Znanium
Lan'

Editorial Board Office:
9 Maya St., 5/192, Krasnoyarsk, 660127, Russian Federation
E-mail: editor@discover-journal.ru
http://discover-journal.ru/

+7 (995) 080-90-42

Свободная цена
© Научно-инновационный центр, 2025

Члены редакционной коллегии

Александрова Оксана Юрьевна, доктор медицинских наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Национальный научно-исследовательский институт общественного здоровья имени Н.А. Семашко» (Москва, Россия)

Ананьев Владимир Николаевич, доктор медицинских наук, профессор, Государственный научный центр РФ - Институт медико-биологических проблем РАН (Москва, Россия)

Анисимов Андрей Павлович, доктор медицинских наук, профессор, Государственный научный центр прикладной микробиологии и биотехнологии Роспотребнадзора (Оболенск, Россия)

Ариничева Ирина Владимировна, доктор биологических наук, доцент, Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина (Краснодар, Россия)

Арутюнян Александр Вартанович, доктор биологических наук, профессор, Научно-исследовательский институт акушерства, гинекологии и репродуктологии им. Д.О. Отта (Санкт-Петербург, Россия)

Астарханова Тамара Саржановна, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, Российский университет дружбы народов (Москва, Россия)

Ашмарина Людмила Филипповна, доктор сельскохозяйственных наук, Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий РАН (Новосибирск, Россия)

Балабко Петр Николаевич, доктор биологических наук, профессор, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (Москва, Россия)

Балакирев Николай Александрович, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, академик РАН, Московская государственная академия ветеринарной медицины и биотехнологии - МВА им. К.И. Скрябина (Москва, Россия)

Барабанов Анатолий Тимофеевич, доктор сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук» (Волгоград, Россия)

Батырбекова Светлана Есимбековна, доктор химических наук, профессор, Казахский национальный университет им. Аль-Фараби (Алматы, Республика Казахстан)

Беленков Алексей Иванович, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, Российский государственный аграрный университет - Московская сельскохозяйственная академия им. К.А. Тимирязева (Москва, Россия)

Беляев Анатолий Аркадьевич, доктор сельскохозяйственных наук, доцент, Новосибирский государственный аграрный университет (Новосибирск, Россия)

Берсенева Евгения Александровна, доктор медицинских наук, профессор, ФГБУ «ВНИИИМТ» Росздравнадзора (Москва, Россия)

Буко Вячеслав Ульянович, доктор биологических наук, профессор, Институт биохимии биологически активных соединений НАН Беларуси (Гродно, Республика Беларусь)

Бяловский Юрий Юльевич, доктор медицинских наук, профессор, Рязанский государственный медицинский университет им. акад. И.П. Павлова (Рязань, Россия)

Виноградов Дмитрий Валериевич, доктор биологических наук, профессор, ФГБОУ ВО РГАТУ Рязанский государственный агротехнологический университет им. П.А. Костычева (Рязань, Россия)

Виткина Татьяна Исааковна, доктор биологических наук, профессор РАН, Дальневосточный научный центр физиологии и патологии дыхания (Благовещенск, Россия)

Волкова Галина Владимировна, доктор биологических наук, член-корреспондент РАН, Федеральный научный центр биологической защиты растений (Краснодар, Россия)

Волынкин Владимир Александрович, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, Всероссийский национальный научно-исследовательский институт виноградарства и виноделия «МАГАРАЧ» (Ялта, Россия)

Воронина Валентина Павловна, доктор сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник, Волгоградский государственный аграрный университет (Волгоград, Россия)

Гармаев Ендон Жамьянович, доктор географических наук, доцент, профессор РАН, член-корреспондент РАН, Байкальский институт природопользования СО РАН (Улан-Удэ, Россия)

Гинс Мурат Сабирович, доктор биологических наук, профессор, член-корреспондент РАН, ФГБНУ «Федеральный научный центр овощеводства» (п. ВНИИССОК, Россия)

Глотов Александр Гаврилович, доктор ветеринарных наук, профессор, Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий РАН (Новосибирск, Россия)

Головин Сергей Евгеньевич, доктор сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник, Федеральный научный селекционно-технологический центр садоводства и питомниководства (Москва, Россия)

Голохваст Кирилл Сергеевич, доктор биологических наук, член-корреспондент РАО, профессор РАН, Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий РАН (Новосибирск, Россия)

Гомбоев Баир Октябрьевич, доктор географических наук, профессор, Байкальский институт природопользования СО РАН (Улан-Удэ, Россия)
Гончаров Сергей Владимирович, доктор биологических наук, доцент, Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина (Краснодар, Россия)
Грязькин Анатолий Васильевич, доктор биологических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова (Санкт-Петербург, Россия)
Денисов Сергей Александрович, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, Поволжский государственный технологический университет (Йошкар-Ола, Россия)
Дерягина Лариса Евгеньевна, доктор медицинских наук, профессор, Московский университет МВД РФ им. В.Я. Кикотя (Москва, Россия)
Дьякович Марина Пинхасовна, доктор биологических наук, профессор, Ангарский государственный технический университет (Ангарск, Россия)
Жмылев Павел Юрьевич, доктор биологических наук, доцент, Государственный университет «Дубна» (Москва, Россия)
Зайцев Владимир Владимирович, доктор биологических наук, профессор, Самарский государственный аграрный университет (Самара, Россия)
Залесов Сергей Вениаминович, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, Уральский государственный лесотехнический университет (Екатеринбург, Россия)
Зудилин Сергей Николаевич, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, Самарский государственный аграрный университет (Самара, Россия)
Иванова Маиса Афанасьевна, доктор медицинских наук, профессор, ФГБУ «Центральный научно-исследовательский институт организации и информатизации здравоохранения» Министерства здравоохранения Российской Федерации (Москва, Россия)
Иванченко Вячеслав Иосифович, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского (Симферополь, Россия)
Иванцова Елена Анатольевна, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, Волгоградский государственный университет (Волгоград, Россия)
Казакова Алия Сабировна, доктор биологических наук, профессор, Азово-Черноморский инженерный институт ФГБОУ ВО Донской ГАУ (Зерноград, Россия)
Казыдуб Нина Григорьевна, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, Омский государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина (Омск, Россия)
Калягин Алексей Николаевич, доктор медицинских наук, профессор, МВА, Иркутский государственный медицинский университет (Иркутск, Россия)
Карганов Михаил Юрьевич, доктор биологических наук, профессор, Научно-исследовательский институт общей патологии и патофизиологии (Москва, Россия)
Кашеваров Николай Иванович, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, академик РАН, Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий РАН (Новосибирск, Россия)
Клименко Виктор Павлович, доктор сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник, Всероссийский национальный научно-исследовательский институт виноградарства и виноделия «МАГАРАЧ» (Ялта, Россия)
Ковалев Николай Николаевич, доктор биологических наук, старший научный сотрудник, Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет (Владивосток, Россия)
Козлов Василий Владимирович, кандидат медицинских наук, доцент, Первый Московский государственный медицинский университет им. И.М. Сеченова (Москва, Россия)
Колесников Сергей Ильич, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, Южный федеральный университет (Ростов-на-Дону, Россия)
Коробова Лариса Николаевна, доктор биологических наук, старший научный сотрудник, ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный аграрный университет» (Новосибирск, Россия)
Кузин Андрей Иванович, доктор сельскохозяйственных наук, доцент, Федеральный научный центр им. И.В. Мичурина (Мичуринск, Россия)
Кузьмин Сергей Владимирович, доктор медицинских наук, профессор, Федеральный научный центр гигиены им. Ф.Ф. Эрисмана Роспотребнадзора (Мытищи, Россия)
Лесовская Марина Игоревна, доктор биологических наук, профессор, Красноярский государственный аграрный университет (Красноярск, Россия)
Лисняк Анатолий Анатольевич, кандидат сельскохозяйственных наук, Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина (Харьков, Украина)
Лиховской Владимир Владимирович, доктор сельскохозяйственных наук, Всероссийский национальный научно-исследовательский институт виноградарства и виноделия «МАГАРАЧ» (Ялта, Россия)
Мазиров Михаил Арнольдович, доктор биологических наук, профессор, Российский государственный аграрный университет – Московская сельскохозяйственная академия им. К.А. Тимирязева (Москва, Россия)
Манаенков Александр Сергеевич, доктор сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник, Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения РАН (Волгоград, Россия)

Манчук Валерий Тимофеевич, доктор медицинских наук, профессор, член-корреспондент РАН, Красноярский научный центр СО РАН (Красноярск, Россия)
Марзанов Нурбий Сафарбиевич, доктор биологических наук, профессор, Федеральный исследовательский центр животноводства - ВИЖ им. акад. Л.К. Эрнста (Подольск, Россия)
Мельченко Александр Иванович, доктор биологических наук, доцент, Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина (Краснодар, Россия)
Меньшикова Лариса Ивановна, доктор медицинских наук, профессор, Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования (Москва, Россия)
Минигалиева Ильзира Амировна, доктор биологических наук, Екатеринбургский медицинский научный центр профилактики и охраны здоровья рабочих промышленных предприятий (Екатеринбург, Россия)
Мойсеенок Андрей Георгиевич, доктор биологических наук, профессор, член-корреспондент НАН Беларуси, Институт биохимии биологически активных соединений НАН Беларуси (Гродно, Республика Беларусь)
Монахос Сократ Григорьевич, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, профессор РАН, Российский государственный аграрный университет - Московская сельскохозяйственная академия им. К.А. Тимирязева (Москва, Россия)
Музурова Людмила Владимировна, доктор медицинских наук, профессор, Саратовский государственный медицинский университет им. В.И. Разумовского (Саратов, Россия)
Мухортов Дмитрий Иванович, доктор сельскохозяйственных наук, доцент, Поволжский государственный технологический университет (Йошкар-Ола, Россия)
Насыбуллина Галия Максутовна, доктор медицинских наук, профессор, Уральский государственный медицинский университет (Екатеринбург, Россия)
Науанова Айнаш Пахуашовна, доктор биологических наук, профессор, Казахский агротехнический университет им. С. Сейфуллина (Астана, Республика Казахстан)
Никитюк Дмитрий Борисович, доктор медицинских наук, профессор, член-корреспондент РАН, Федеральный исследовательский центр питания, биотехнологии и безопасности пищи (Москва, Россия)
Остренко Константин Сергеевич, доктор биологических наук, Федеральный исследовательский центр животноводства - ВИЖ им. акад. Л.К. Эрнста (Подольск, Россия)
Панкрушина Алла Николаевна, доктор биологических наук, профессор, Тверской государственный университет (Тверь, Россия)
Паштецкий Владимир Степанович, доктор сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник, член-корреспондент РАН, Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма (Симферополь, Россия)
Полунин Валерий Сократович, доктор медицинских наук, профессор, Российский национальный исследовательский медицинский университет им. Н.И. Пирогова (Москва, Россия)
Полунина Наталья Валентиновна, доктор медицинских наук, профессор, член-корреспондент РАН, Российский национальный исследовательский медицинский университет им. Н.И. Пирогова (Москва, Россия)
Поползухина Нина Алексеевна, доктор сельскохозяйственных наук, Омский государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина (Омск, Россия)
Пронина Галина Иозеповна, доктор биологических наук, доцент, Российский государственный аграрный университет - Московская сельскохозяйственная академия им. К.А. Тимирязева (Москва, Россия)
Пуликов Анатолий Степанович, доктор медицинских наук, профессор, отличник здравоохранения РФ, Красноярский научный центр СО РАН (Красноярск, Россия)
Рапопорт Жан Жозефович, доктор медицинских наук, профессор, отличник здравоохранения СССР, заслуженный изобретатель СССР, НИИ МПС (Россия/Израиль)
Рахимов Александр Имануилович, доктор химических наук, профессор, Волгоградский государственный технический университет (Волгоград, Россия)
Рахимова Надежда Александровна, доктор химических наук, профессор, Волгоградский государственный технический университет (Волгоград, Россия)
Рожко Татьяна Владимировна, кандидат биологических наук, доцент, Красноярский государственный медицинский университет им. проф. В.Ф. Войно-Ясенецкого (Красноярск, Россия)
Саввина Надежда Валерьевна, доктор медицинских наук, профессор, Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова (Якутск, Россия)
Савельева Наталья Николаевна, доктор биологических наук, Федеральный научный центр им. И.В. Мичурина (Мичуринск, Россия)
Сетков Николай Александрович, доктор биологических наук, профессор, Сибирский федеральный университет (Красноярск, Россия)
Смелик Виктор Александрович, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный аграрный университет (Санкт-Петербург, Россия)

Стецов Григорий Яковлевич, доктор сельскохозяйственных наук, доцент, ведущий научный сотрудник Федеральный Алтайский научный центр агробиотехнологий (Барнаул)
Суханова Светлана Фаилевна, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, Курганская государственная сельскохозяйственная академия им. Т.С. Мальцева (Лесниково, Россия)
Сычев Виктор Гаврилович, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, академик РАН, Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии им. Д.Н. Прянишникова (Москва, Россия)
Тармаева Инна Юрьевна, доктор медицинских наук, профессор, Федеральный исследовательский центр питания, биотехнологии и безопасности пищи (Москва, Россия)
Терещенко Сергей Юрьевич, доктор медицинских наук, профессор, Красноярский научный центр СО РАН (Красноярск, Россия)
Торопова Елена Юрьевна, доктор биологических наук, профессор, Новосибирский государственный аграрный университет (Новосибирск, Россия)
Трифонова Татьяна Анатольевна, доктор биологических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, почётный работник высшего профессионального образования Российской Федерации, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (Москва, Россия)
Трунов Юрий Викторович, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, Мичуринский государственный аграрный университет (Мичуринск, Россия)
Ткачёв Александр Владимирович, доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры ветеринарной медицины, старший научный сотрудник ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (Москва, Россия)
Тыщенко Елизавета Алексеевна, доктор технических наук, доцент, Кузбасская государственная сельскохозяйственная академия (Кемерово, Россия)
Упадышев Михаил Тарьевич, доктор сельскохозяйственных наук, профессор РАН, член-корреспондент РАН, ФГБНУ Федеральный научный селекционно-технологический центр садоводства и питомниководства (Москва, Россия)
Черных Наталья Анатольевна, доктор биологических наук, профессор, Московский государственный институт международных отношений (университет) (Москва, Россия)
Чернявских Владимир Иванович, доктор сельскохозяйственных наук, доцент, Федеральный научный центр кормопроизводства и агроэкологии имени В.Р. Вильямса (Лобня, Россия)
Шнайдер Наталья Алексеевна, доктор медицинских наук, профессор, Национальный медицинский исследовательский центр психиатрии и неврологии им. В.М. Бехтерева (Санкт-Петербург, Россия)
Юшков Андрей Николаевич, доктор сельскохозяйственных наук, Федеральный научный центр им. И.В. Мичурина (Мичуринск, Россия)

Editorial Board Members

Oksana Yu. Alexandrova, Doctor of Medical Sciences, Professor, National Research Institute of Public Health named after N.A. Semashko (Moscow, Russia)
Vladimir N. Ananiev, Doctor of Medical Sciences, Professor, State Scientific Center of the Russian Federation - Institute of Biomedical Problems of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia)
Andrey P. Anisimov, Doctor of Medical Sciences, Professor, State Research Center for Applied Microbiology and Biotechnology of Rospotrebnadzor (Obolensk, Russia)
Irina V. Arinicheva, Doctor of Biological Sciences, Associate Professor, Kuban State Agrarian University named after I. T. Trubilin (Krasnodar, Russia)
Alexander V. Arutyunyan, Doctor of Biological Sciences, Professor, Research Institute of Obstetrics, Gynecology and Reproductology named after D. O. Ott (St. Petersburg, Russia)
Tamara S. Astarkhanova, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Peoples' Friendship University of Russia (Moscow, Russia)
Lyudmila F. Ashmarina, Doctor of Agricultural Sciences, Siberian Federal Scientific Center for Agrobiotechnologies of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia)
Petr N. Balabko, Doctor of Biological Sciences, Professor, Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russia)
Nikolai A. Balakirev, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences, Moscow State Academy of Veterinary Medicine and Biotechnology named after K. I. Skryabin (Moscow, Russia)
Anatoly T. Barabanov, Doctor of Agricultural Sciences, Senior Researcher, Federal Scientific Center for Agroecology, Integrated Land Reclamation and Protective Aforestation of the Russian Academy of Sciences (Volgograd, Russia)
Svetlana Ye. Batyrbekova, Doctor of Chemical Sciences, Professor, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Republic of Kazakhstan)
Aleksey I. Belenkov, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, Russia)
Anatoly A. Belyaev, Doctor of Agricultural Sciences, Associate Professor, Novosibirsk State Agrarian University (Novosibirsk, Russia)
Evgenia A. Berseneva, Doctor of Medical Sciences, Professor, All-Russian Research and Testing Institute of Medical Equipment (Moscow, Russia)
Vyacheslav U. Buko, Doctor of Biological Sciences, Professor, Institute of Biochemistry of Biologically Active Compounds of the National Academy of Sciences of Belarus (Grodno, Republic of Belarus)
Yury Yu. Byalovsky, Doctor of Medical Sciences, Professor, Ryazan State Medical University named after academician I.P. Pavlova (Ryazan, Russia)
Dmitry V. Vinogradov, Doctor of Biological Sciences, Professor, Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev (Ryazan, Russia)
Tatyana I. Vitkina, Doctor of Biological Sciences, Professor of the Russian Academy of Sciences, Far Eastern Scientific Center for Physiology and Pathology of Respiration (Blagoveshchensk, Russia)
Galina V. Volkova, Doctor of Biological Sciences, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Federal Scientific Center for Biological Plant Protection (Krasnodar, Russia)
Vladimir A. Volynkin, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, All-Russian National Research Institute of Viticulture and Winemaking "Magarach" (Yalta, Russia)
Valentina P. Voronina, Doctor of Agricultural Sciences, Senior Researcher, Volgograd State Agrarian University (Volgograd, Russia)
Endon Zh. Garmaev, Doctor of Geography, Associate Professor, Professor of the Russian Academy of Sciences, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Baikal Institute of Nature Management Siberian branch of the Russian Academy of Sciences (Ulan-Ude, Russia)
Murat S. Gins, Doctor of Biological Sciences, Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Federal Scientific Center for Vegetable Growing (VNIISSOK, Russia)
Aleksandr G. Glotov, Doctor of Veterinary Sciences, Professor, Siberian Federal Scientific Center for Agrobiotechnologies of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia)
Sergey E. Golovin, Doctor of Agricultural Sciences, Senior Researcher, Federal Scientific Breeding and Technological Center for Horticulture and Nursery (Moscow, Russia)
Kirill S. Golokhvast, Doctor of Biological Sciences, Corresponding Member of the Russian Academy of Education, Professor of the Russian Academy of Sciences, Siberian Federal Scientific Center for Agricultural Biotechnologies of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia)
Bair O. Gomboev, Doctor of Geography, Professor, Baikal Institute of Nature Management Siberian branch of the Russian Academy of Sciences (Ulan-Ude, Russia)
Sergey V. Goncharov, Doctor of Biological Sciences, Associate Professor, Kuban State Agrarian University named after I. T. Trubilin (Krasnodar, Russia)
Anatoly V. Gryazkin, Doctor of Biological Sciences, Professor, Saint-Petersburg State Forest Technical

University named after S.M. Kirova (St. Petersburg, Russia)
Sergey A. Denisov, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Volga State Technological University (Yoshkar-Ola, Russia)
Larisa E. Deryagina, Doctor of Medical Sciences, Professor, Moscow University of the Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation named after V.Y. Kikot (Moscow, Russia)
Marina P. Dyakovich, Doctor of Biological Sciences, Professor, Angarsk State Technical University (Angarsk, Russia)
Pavel Yu. Zhmylev, Doctor of Biological Sciences, Associate Professor, State University "Dubna" (Moscow, Russia)
Vladimir V. Zaitsev, Doctor of Biological Sciences, Professor, Samara State Agrarian University (Samara, Russia)
Sergey V. Zalesov, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Ural State Forest Engineering University (Yekaterinburg, Russia)
Sergey N. Zudilin, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Samara State Agrarian University (Samara, Russia)
Maisa A. Ivanova, Doctor of Medical Sciences, Professor, Federal State Budgetary Institution "Central Research Institute for the Organization and Informatization of Healthcare" of the Ministry of Health of the Russian Federation (Moscow, Russia)
Vyacheslav I. Ivanchenko, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, V.I. Vernadsky Crimean Federal University (Simferopol, Russia)
Elena A. Ivantsova, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Volgograd State University (Volgograd, Russia)
Aliya S. Kazakova, Doctor of Biological Sciences, Professor, Azov-Chernomorsk Engineering Institute, Donskoy State Agrarian University (Zernograd, Russia)
Nina G. Kazydub, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Omsk State Agrarian University named after P. Stolypin (Omsk, Russia)
Aleksey N. Kalyagin, Doctor of Medical Sciences, Professor, MBA, Irkutsk State Medical University (Irkutsk, Russia)
Mikhail Yu. Karganov, Doctor of Biological Sciences, Professor, Research Institute of General Pathology and Pathophysiology (Moscow, Russia)
Nikolay I. Kashevarov, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Honored Worker of Science of the Russian Federation, Academician of the Russian Academy of Sciences, Siberian Federal Scientific Center for Agricultural Biotechnologies of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia)
Viktor P. Klimenko, Doctor of Agricultural Sciences, Senior Researcher, All-Russian National Research Institute of Viticulture and Winemaking "Magarach" (Yalta, Russia)
Nikolai N. Kovalev, Doctor of Biological Sciences, Senior Researcher, Far Eastern State Technical Fisheries University (Vladivostok, Russia)
Vasily V. Kozlov, Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, I.M. Sechenov First Moscow State Medical University (Moscow, Russia)
Sergey I. Kolesnikov, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Southern Federal University (Rostov-on-Don, Russia)
Larisa N. Korobova, Doctor of Biological Sciences, Senior Researcher, Novosibirsk State Agrarian University (Novosibirsk, Russia)
Andrey I. Kuzin, Doctor of Agricultural Sciences, Associate Professor, I.V. Michurin Federal Research Center (Michurinsk, Russia)
Sergey V. Kuzmin, Doctor of Medical Sciences, Professor, Federal Scientific Center of Hygiene named after F.F. Erisman (Mytishchi, Russia)
Marina I. Lesovskaya, Doctor of Biological Sciences, Professor, Krasnoyarsk State Agrarian University (Krasnoyarsk, Russia)
Anatoly A. Lisnyak, Candidate of Agricultural Sciences, V. N. Karazin Kharkiv National University (Kharkiv, Ukraine)
Vladimir V. Likhovskoy, Doctor of Agricultural Sciences, All-Russian National Research Institute of Viticulture and Winemaking "Magarach" (Yalta, Russia)
Mikhail A. Mazirov, Doctor of Biological Sciences, Professor, Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, Russia)
Alexander S. Manaenkov, Doctor of Agricultural Sciences, Senior Researcher, Federal Research Center for Agroecology, Integrated Land Reclamation and Protective Aforestation of the Russian Academy of Sciences (Volgograd, Russia)
Valery T. Manchuk, Doctor of Medical Sciences, Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Krasnoyarsk, Russia)
Nurbiy S. Marzanov, Doctor of Biological Sciences, Professor, L.K. Ernst Federal Science Center for Animal Husbandry (Podolsk, Russia)
Alexander I. Melchenko, Doctor of Biological Sciences, Associate Professor, Kuban State Agrarian University named after I. T. Trubilin (Krasnodar, Russia)
Larisa I. Menshikova, Doctor of Medical Sciences, Professor, Russian Medical Academy of Continuous Professional Education (Moscow, Russia)
Ilzira A. Minigalieva, Doctor of Biological Sciences, Yekaterinburg Medical Research Center for Prevention and Health Protection of Industrial Workers (Yekaterinburg, Russia)
Andrei G. Moiseenok, Doctor of Biological Sciences, Professor, Corresponding Member of the National

Academy of Sciences of Belarus, Institute of Biochemistry of Biologically Active Compounds of the National Academy of Sciences of Belarus (Grodno, Republic of Belarus)
Sokrat G. Monakhos, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Professor of the Russian Academy of Sciences, Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, Russia)
Lyudmila V. Muzurova, Doctor of Medical Sciences, Professor, Saratov State Medical University named after V.I. Razumovsky (Saratov, Russia)
Dmitry I. Mukhortov, Doctor of Agricultural Sciences, Associate Professor, Volga State Technological University (Yoshkar-Ola, Russia)
Galia M. Nasybullina, Doctor of Medical Sciences, Professor, Ural State Medical University (Yekaterinburg, Russia)
Ainash P. Nauanova, Doctor of Biological Sciences, Professor, S.Seifullin Kazakh AgroTechnical Research University (Astana, Republic of Kazakhstan)
Dmitry B. Nikityuk, Doctor of Medical Sciences, Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Federal Research Center for Nutrition, Biotechnology and Food Safety (Moscow, Russia)
Konstantin S. Ostrenko, Doctor of Biological Sciences, L.K. Ernst Federal Science Center for Animal Husbandry (Podolsk, Russia)
Alla N. Pankrushina, Doctor of Biological Sciences, Professor, Tver State University (Tver, Russia)
Vladimir S. Pashtetsky, Doctor of Agricultural Sciences, Senior Researcher, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Research Institute of Agriculture of the Crimea (Simferopol, Russia)
Valeriy S. Polunin, Doctor of Medical Sciences, Professor, Pirogov Russian National Research Medical University (Moscow, Russia)
Natalya V. Polunina, Doctor of Medical Sciences, Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Pirogov Russian National Research Medical University (Moscow, Russia)
Nina A. Popolzukhina, Doctor of Agricultural Sciences, Omsk State Agrarian University named after P. Stolypin (Omsk, Russia)
Galina I. Pronina, Doctor of Biological Sciences, Associate Professor, Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, Russia)
Anatoly S. Pulikov, Doctor of Medical Sciences, Professor, Excellence in Public Health of the Russian Federation, Krasnoyarsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Krasnoyarsk, Russia)
Zhan Zh. Rapoport, Doctor of Medical Sciences, Professor, Excellence in Public Health of the USSR, Honored Inventor of the USSR, Research Institute of the Ministry of Railways (Russia/Israel)
Alexander I. Rakhimov, Doctor of Chemical Sciences, Professor, Volgograd State Technical University (Volgograd, Russia)
Nadezhda A. Rakhimova, Doctor of Chemical Sciences, Professor, Volgograd State Technical University (Volgograd, Russia)
Igor A. Rodin, Doctor of Veterinary Sciences, Professor, Kuban State Agrarian University named after I. T. Trubilin (Krasnodar, Russia)
Tatyana V. Rozhko, Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Krasnoyarsk State Medical University named after Professor V.F. Voino-Yasenetsky (Krasnoyarsk, Russia)
Alexander S. Rulev, Doctor of Agricultural Sciences, Academician of the Russian Academy of Sciences, All-Russian Research Institute of Irrigated Agriculture (Volgograd, Russia)
Nadezhda V. Savvina, Doctor of Medical Sciences, Professor, M.K. Ammosov North-Eastern Federal University in Yakutsk (Yakutsk, Russia)
Natalya N. Savelyeva, Doctor of Biological Sciences, I.V. Michurin Federal Research Center (Michurinsk, Russia)
Nikolai A. Setkov, Doctor of Biological Sciences, Professor, Siberian Federal University (Krasnoyarsk, Russia)
Viktor A. Smelik, Doctor of Technical Sciences, Professor, St. Petersburg State Agrarian University (St. Petersburg, Russia)
Grigory Ya. Stetsov, Doctor of Agricultural Sciences, Associate Professor, Leading Researcher Federal Altai Scientific Center for Agrobiotechnologies (Barnaul, Russia)
Svetlana F. Sukhanova, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Kurgan State Agricultural Academy named after T.S. Maltsev (Lesnikovo, Russia)
Viktor G. Sychev, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences, All-Russian Scientific Research Institute of Agrochemistry named after D.N. Pryanishnikov (Moscow, Russia)
Inna Yu. Tarmaeva, Doctor of Medical Sciences, Professor, Federal Research Center for Nutrition, Biotechnology and Food Safety (Moscow, Russia)
Sergey Yu. Tereshchenko, Doctor of Medical Sciences, Professor, Krasnoyarsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Krasnoyarsk, Russia)
Elena Yu. Toropova, Doctor of Biological Sciences, Professor, Novosibirsk State Agrarian University (Novosibirsk, Russia)
Tatyana A. Trifonova, Doctor of Biological Sciences, Professor, Honored Worker of Science of the Russian Federation, Honorary Worker of Higher Professional Education of the Russian Federation, Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russia)
Yury V. Trunov, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Michurinsk State Agrarian University (Michurinsk, Russia)

Alexander V. Tkachev, Doctor of Agricultural Sciences, Professor of the Department of Veterinary Medicine, Senior Researcher Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, Russia)
Elizaveta A. Tyshchenko, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Kuzbass State Agricultural Academy (Kemerovo, Russia)
Mikhail T. Upadyshev, Doctor of Agricultural Sciences, Professor of the Russian Academy of Sciences, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Federal State Budget Scientific Institution Federal Scientific Selection and Technological Center for Horticulture and Nursery (Moscow, Russia)
Natalya A. Chernykh, Doctor of Biological Sciences, Professor, Moscow State Institute of International Relations (University) (Moscow, Russia)
Vladimir I. Chernyavskikh, Doctor of Agricultural Sciences, Associate Professor, Federal Williams Research Center of Forage Production and Agroecology (Lobnya, Russia)
Natalya A. Schneider, Doctor of Medical Sciences, Professor, Bekhterev National Medical Research Center for Psychiatry and Neurology (St. Petersburg, Russia)
Andrey N. Yushkov, Doctor of Agricultural Sciences, I.V. Michurin Federal Research Center (Michurinsk, Russia)

ФИЗИОЛОГИЯ ЧЕЛОВЕКА И ЖИВОТНЫХ

HUMAN AND ANIMAL PHYSIOLOGY

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-4-1238 **EDN: CXMVYV**
УДК 612.1:616.151:636.034

CC BY NC ND

Научная статья

МОЛЕКУЛЯРНЫЙ ВОДОРОД В ТЕХНОЛОГИИ ИСКУССТВЕННОГО ОСЕМЕНЕНИЯ КОРОВ

М.Н. Иващенко, А.В. Дерюгина, А.И. Ерзутов, В.А. Петров, А.А. Белов

Аннотация

Обоснование. Криоконсервация спермы крупного рогатого скота - эффективный метод племенной работы. Для повышения эффективности криоконсервации требуется совершенствование синтетических разбавителей для замораживания спермы. Особое внимание отводится поиску новых криопротекторов, способных повысить выживаемость сперматозоидов и сохранить их фертильность в процессе криоконсервации.

Цель. Оценка результативности искусственного осеменения коров спермой, содержащей молекулярный водород.

Материалы и методы. Для эксперимента было отобрано 2 группы животных, по 50 голов в каждой. Коров контрольной группы осеменяли спермой, замороженной в среде «BioXcell», а животных опытной группы спермой, замороженной среде «BioXcell» с молекулярным водородом. Осеменение коров проводили групповым методом путем синхронизации половой охоты по схеме «Овсинх». Эффективность осеменения оценивалась на основе данных ректального УЗИ исследования после осеменения. Было проведено сравнение результативности искусственного осеменения коров спермой, криоконсервированной в усовершенствованной среде, содержащей молекулярный водород, с показателями оплодотворяемости, полученными при использовании спермы, замороженной в среде без молекулярного водорода.

Результаты. Оплодотворяемость коров спермой, содержащей молекулярный водород, через 3 месяца повысилась на 11,5% по сравнению с использованием спермы без молекулярного водорода.

Заключение. Использование молекулярного водорода в составе среды для разбавления семени позволяет повысить оплодотворяющую способность спермы быков и увеличить показатели оплодотворения коров при искусственном осеменении.

Ключевые слова: молекулярный водород; сперма; коровы; искусственное осеменение

Для цитирования. Иващенко, М. Н., Дерюгина, А. В., Ерзутов, А. И., Петров, В. А., & Белов, А. А. (2025). Молекулярный водород в технологии искусственного осеменения коров. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(4), 11-24. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-4-1238

Original article

MOLECULAR HYDROGEN IN THE TECHNOLOGY OF ARTIFICIAL INSEMINATION OF COWS

M.N. Ivashchenko, A.V. Deryugina, A.I. Erzutov, V.A. Petrov, A.A. Belov

Abstract

Background. Cryopreservation of sperm from cattle is an effective method of breeding work. To increase the efficiency of cryopreservation, the improvement of synthetic diluents for freezing sperm is required. Special attention is paid to the search for new cryoprotectors capable of increasing sperm survival and preserving their fertility during cryopreservation.

Purpose. Evaluation of the effectiveness of artificial insemination of cows with sperm containing molecular hydrogen.

Materials and methods. For the experiment, 2 groups of animals were selected, 50 heads each. The cows of the control group were inseminated with sperm frozen in a BioXcell medium, and the animals of the experimental group with sperm frozen in a BioXcell medium with molecular hydrogen. Insemination of cows was carried out by a group method by synchronizing sexual hunting according to the "Ovsinh" scheme. The effectiveness of insemination was evaluated on the basis of rectal ultrasound examination data after insemination. A comparison was made of the effectiveness of artificial insemination of cows with sperm cryopreserved in an

improved medium containing molecular hydrogen with the indicators of fertilization obtained using sperm frozen in an environment without molecular hydrogen.

Results. Fertilization of cows with sperm containing molecular hydrogen increased by 11.5% after 3 months compared with the use of cryopreserved sperm without molecular hydrogen.

Conclusion. The results of the experiments indicate that the use of molecular hydrogen in the composition of the medium for diluting the seed makes it possible to increase the fertilizing ability of bull sperm and increase the fertilization rates of cows during artificial insemination.

Keywords: molecular hydrogen; sperm; cows; artificial insemination

For citation. Ivashchenko, M. N., Deryugina, A. V., Erzutov, A. I., Petrov, V. A., & Belov, A. A. (2025). Molecular hydrogen in the technology of artificial insemination of cows. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(4), 11-24. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-4-1238

Введение

Криоконсервация спермы крупного рогатого скота является эффективным методом племенной работы, позволяющим использовать генетический потенциал высокопродуктивных животных. Используемые при этом быки-производители проверены по качеству потомства, а коровы отвечают предъявляемым требованиям по молочной продуктивности [3].

Однако в области криоконсервации спермы быков существуют нерешенные проблемы, которые ограничивают эффективность искусственного осеменения животных. Во-первых, при глубоком замораживании значительная часть сперматозоидов (более 40-50%) погибает в процессе замораживания-оттаивания. Во-вторых, оплодотворяемость коров при использовании криоконсервированной спермы остается по-прежнему недостаточно высока.

Для повышения эффективности криоконсервации требуется проведение углубленных исследований, направленных на совершенствование синтетических разбавителей для глубокого замораживания спермы. Особое внимание необходимо уделить поиску новых криопротекторов и биологически активных веществ, способных повысить выживаемость сперматозоидов и сохранить их фертильность в процессе криоконсервации.

В настоящее время, ведущим фактором в снижении фертильности сперматозоидов считается окислительный стресс [13; 15].

Известно, что для мембран сперматозоидов характерна высокая концентрация полиненасыщенных жирных кислот, что делает их особенно

чувствительными к окислительному стрессу. Активные формы кислорода образующиеся в ходе метаболизма спермиев, способствует развитию перекисного окисления липидов. Перекисное окисление липидов оказывает негативное влияние на показатели подвижности, концентрации сперматозоидов, вызывает истощение энергетических запасов [14; 16; 20].

Молекулярный водород является «новым» антиоксидантом для профилактического и терапевтического применения [8; 18]. В отличие от других антиоксидантов, молекулярный водород инактивирует высокореактивные соединения как гидроксильный радикал, пероксинитрит не нарушая метаболизм и передачу сигналов с помощью активных форм кислорода. Молекулярный водород не только снижает окислительный стресс, но и обладает противовоспалительным, противоаллергическим, противоапоптическим действием, стимулирует энергетический обмен, регулирует экспрессию генов [8;17; 18; 19].

Наши исследования показали, что молекулярный водород положительно влияет на морфо-функциональные показатели сперматозоидов, при добавлении его в среду для замораживания спермы. При добавлении молекулярного водорода в среду для разбавления семени и последующей криоконсервации наблюдается увеличении подвижности и средней скорости движения сперматозоидов, отмечено уменьшение окислительных процессов, увеличение содержания АТФ и жизнеспособности спермиев [6; 8].

В этой связи *цель исследования* – оценка результативности искусственного осеменения коров спермой, содержащей молекулярный водород.

Материалы и методы исследования

Научно-производственные опыты проведены на кафедре «Физиологии, биохимии животных и акушерства» НГАТУ им. Л.Я Флорентьева.

Для замораживания спермы быков использовали эякуляты с подвижностью более 80% и концентрацией не менее 1 млрд/мл. Эякулят разбавляли синтетической средой «BioXcell» (IMV Technologies, L'Agile, Франция). Для оценки влияния молекулярного водорода на сперматозоиды в состав разбавителя «BioXcell» в качестве криопротектора добавляли молекулярный водород в концентрации 1,2 мг/л. Молекулярный водород получали используя установку Бозон-Н-H_2/O_3. Замораживали сперму в виде гранул объемом 0,2 мл. Оттаивали сперму в 3% растворе цитрата натрия. Отобранные образцы замороженно-оттаянной спермы быков оценивали на выживаемость спермиев при температуре 38°С, по подвижности и состоянию акросом спермиев.

Для эксперимента было отобрано 2 группы животных, по 50 голов в каждой. Коров контрольной группы осеменяли спермой, замороженной в среде «BioXcell», а животных опытной группы – спермой, замороженной среде «BioXcell» с молекулярным водородом. В дозе для осеменения содержалось 15 млн подвижных сперматозоидов согласно ГОСТ 26030-2015 [5]. Осеменение коров проводили групповым методом путем синхронизации половой охоты по схеме «Овсинх». Эффективность осеменения оценивалась на основе данных ректального УЗИ исследования на 35 день после осеменения. Было проведено сравнение результативности искусственного осеменения коров спермой, криоконсервированной в усовершенствованной среде, содержащей молекулярный водород, с показателями оплодотворяемости, полученными при использовании спермы, замороженной в среде без молекулярного водорода.

Содержание и кормление животных контрольной и опытной групп было одинаковым и осуществлялось согласно принятым в хозяйстве нормам. За состоянием обмена веществ следили по показателям: температуре тела, частоте пульса и количество дыхательных движений в минуту по общепринятым методикам [11].

Состояние естественной резистентности у животных изучали, оценивая лизоцимную и бактерицидную активность сыворотки крови. Лизоцимную активность – фотоэлектроколориметрическим методом с использованием тест-культуры Micrococcus lysodeikticus, бактерицидную активность сыворотки крови – фотонефелометрическим методом с применением тест-культуры Escherichia coli [11]. Фагоцитарную активность нейтрофилов крови определяли по методу А.И. Иванова (1967) [7]. Гематологические показатели исследовали на гематологическом анализаторе Гемалайт 1270 (Dixion, Россия).

Для статистического анализа полученных данных применялась программа Statistica. Оценка достоверности результатов осуществлялась с использованием t-критерия Стьюдента. Уровень статистической значимости был установлен на уровне 0,05.

Результаты исследования и их обсуждение

На первом этапе научно-производственного опыта определяли физиологическое состояние коров по клиническим, гематологическим показателям и показателям естественной резистентности.

Оценивали клинико-физиологические показатели животных: измеряли температуру тела, частоту пульса и количество дыхательных движений

в минуту. Установлено, что клинико-физиологические показатели коров контрольной и опытной групп находились в пределах физиологической нормы (табл. 1).

Таблица 1.

Клинико-физиологические показатели животных контрольной и опытной групп, (M±m)

Показатель	Контрольная группа	Опытная группа	Норма по И.П. Кондрахину, 2004 [9]
Температура, °С	38,5±0,19	38,9±0,25	37,5-39,0
Пульс, ударов/мин	62,4±0,79	61,1±0,95	50-80
Дыхание, дых. дв/мин	22,4±0,98	19,6±1,16	15-30

Средняя температура тела у коров контрольной группы – 38,5±0,19 °С, частота пульса 62,4±0,79 ударов/мин, средняя частота дыхательных движений 22,4±0,98 дых. дв/мин, что находится в пределах физиологической нормы. Средняя температура тела у коров опытной группы составила 38,9±0,25 °С, частота пульса 61,1±0,95 ударов/мин, средняя частота дыхательных движений 19,6±1,16 дых. дв/мин, что находится в пределах физиологической нормы. Разница между величинами контрольной и опытной групп животных была статистически недостоверной (P>0,05).

Диагностическим методом, позволяющим в комплексе с клинико-физиологическими показателями определить функциональное состояние животных является гематологический анализ крови [10, 12].

При анализе гематологических показателей крови у контрольной и опытной групп животных, установлено, что все показатели находились в пределах физиологической нормы (табл. 2).

Таблица 2.

Гематологические показатели крови животных контрольной и опытной групп, (M±m)

Показатель	Контрольная группа	Опытная группа	Норма по И.П. Кондрахину, 2004 [9]
Лейкоциты, 10^9 /л	8,6±0,34	8,1±0,54	4–11
Тромбоциты, 10^9 /л	498±43,16	502±62,46	90–380
Эритроциты, 10^{12}/л	6,2±0,49	6,3±0,59	5–9
Гемоглобин, г/л	138,25 ±8,34	142,54 ±7,22	80–150

Статистически значимых различий между контрольной и опытной группами коров по содержанию лейкоцитов, тромбоцитов, эритроцитов и гемоглобина не выявлено.

Показатели клеточного и гуморального иммунитета отражают течение физиологических процессов и реализацию продуктивного потенциала организма животного [1, 2, 4, 7]. Нами были изучены бактерицидная (БАСК) и лизоцимная активность сыворотки крови (ЛАСК), а также фагоцитарная активность нейтрофилов (табл. 3).

Таблица 3.

Показатели естественной резистентности крови животных контрольной и опытной групп, (M±m)

Показатель	Контрольная группа	Опытная группа
БАСК, %	44,28 ± 1,36	42,52 ± 1,52
ЛАСК, %	21,29 ± 1,11	23,16 ± 1,24
Фагоцитарная активность нейтрофилов, %	54,16 ± 1,95	55,09 ± 2,08

Показатели БАСК и ЛАСК между контрольной и опытной группами животных не имели достоверных отличий. Исследование фагоцитарной активности нейтрофилов также не показали достоверных отличий в показателях фагоцитоза между анализируемыми группами.

Таким образом, физиологические, гематологические показатели и показатели естественной резистентности у коров опытной группы находились в пределах интервалов физиологической нормы.

Во втором этапе научно-производственного опыта оценено влияние молекулярного водорода в составе замораживающей среды на результативность осеменения коров криоконсервированной спермой. Как видно из данных таблицы 4 оплодотворяемость коров через 3 месяца повысилась на 11,5% по сравнению с спермой без молекулярного водорода.

Таблица 4.

Результативность осеменения коров опытной группы спермой, замороженной с молекулярным водородом, (M±m)

Показатель	Контрольная группа	Опытная группа
Осеменено коров	50	50
Выбыло из опыта коров	2	3
Стельных коров через 35 сут.	23	28
Стельных коров через 3 мес.	20	25
%	41,7	53,2

Результаты опытов свидетельствуют, что использование молекулярного водорода в составе среды для разбавления семени позволяет повысить оплодотворяющую способность спермы быков и увеличить показатели оплодотворения коров при искусственном осеменении.

Заключение

Криоконсервация репродуктивных клеток крупного рогатого скота одна из важнейших задач современной биотехники воспроизводства. Для успешного создания криобанков гамет требуется разработка и внедрение новых соединений с криопротекторными свойствами. Включение молекулярного водорода в состав криозащитного раствора является целесообразным, так как вещество нетоксично, не откладывается в клетках, не вызывает разрушения биологических мембран, оказывает влияние на показатели перекисного окисления липидов, повышая антиоксидантную активность [8; 17; 18].

Заключение комитета по этике. Исследование было проведено в полном соответствии с этическими нормами, установленными Европейской конвенцией о защите позвоночных животных, участвующих в экспериментах или научных исследованиях (ETS №123, Страсбург, 1986), а также с требованиями Приказа Министерства Здравоохранения Российской Федерации № 708н от 28 августа 2010 года.

Информация о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация о спонсорстве. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-26-00205.

Список литературы

1. Баймишев, М. Х., & Баймишев, Х. Б. (2016). Инновационный приём повышения естественной резистентности организма коров перед родами. *Современные инновации*, *6*(8), 42–49. EDN: https://elibrary.ru/WBNZBH
2. Битюков, Е. И., & Миненков, Н. А. (2012). Изменение бактерицидной и лизоцимной активности сыворотки крови в разные фазы воспроизводства у коров. *Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии*, *4*, 55–57. EDN: https://elibrary.ru/ROBSFT
3. Будевич, А. И., & Мордань, Г. Г. (2002). Совершенствование технологии искусственного осеменения крупного рогатого скота. *Весці Акадэміі аграр-*

ных навук Рэспублікі Беларусь. Серыя с.-г. навук, *3*, 77–79. EDN: https://elibrary.ru/LHSMDO

4. Гаркави, Л. Х., Квакина, Е. Б., Кузьменко, Т. С., & Шихлярова, А. И. (2002). *Антистрессорные реакции и активационная терапия. Реакция активации как путь к здоровью через процессы самоорганизации* (196 с.). Екатеринбург: РИА «Филантроп». ISBN: 5-901112-10-5. EDN: https://elibrary.ru/XMYPUT
5. ГОСТ 26030-2015. *Средства воспроизводства. Сперма быков замороженная. Технические условия* (20 с.). Москва: Стандартинформ.
6. Дерюгина, А. В., Иващенко, М. Н., & Лодяной, М. С. (2022). Оценка резистентности мембран сперматозоидов быков в процессе долгосрочного хранения. *Естественные и технические науки*, *1*(164), 107–109. EDN: https://elibrary.ru/QLDSAO
7. Иванов, А. И., & Чухловин, Б. А. (1967). К методике определения поглотительной и переваривающей способности нейтрофилов. *Лабораторное дело*, *10*, 610.
8. Иващенко, М. Н., Дерюгина, А. В., Ермохина, О. Н., Игнатьев, П. С., Латушко, М. И., Метелин, В. Б., Белов, А. А., & Ерзутов, А. И. (2024). Изменение метаболизма нативных и деконсервированных сперматозоидов быков под действием молекулярного водорода. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *16*(3), 133–148. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2024-16-3-1152. EDN: https://elibrary.ru/LOCQFZ
9. Кондрахин, И. П., Архипов, А. В., & Левченко, В. И. (2004). *Методы ветеринарной клинической лабораторной диагностики: справочник* (520 с.). Москва: КолосС. ISBN: 5-9532-0165-6. EDN: https://elibrary.ru/QKWKND
10. Левицкая, Т. Т. (2014). Влияние генотипа на проявление гуморальных факторов естественной резистентности. *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*, *6*, 85–88. EDN: https://elibrary.ru/SJDSIX
11. *Оценка и коррекция неспецифической резистентности животных*: методические рекомендации (25 с.). Воронеж: [б. и.]. (Одобрено секцией «Патология, фармакология и терапия» отделения ветеринарной медицины РАСХ.)
12. Смирнова, Ю. М., Платонов, А. В., & Шамахов, А. А. (2022). Показатели крови коров при включении в рацион добавки на основе гуминовых кислот. *Вестник КрасГАУ*, *8*(185), 100–105. https://doi.org/10.36718/1819-4036-2022-8-100-105. EDN: https://elibrary.ru/CERATW
13. Aktan, G., Dogru-Abbasoglu, S., & Kucukgergin, C. (2013). Mystery of idiopathic male infertility: is oxidative stress an actual risk? *Fertility and Sterility*, *99*(5), 1211–1215.

14. Cocuzza, M., Sikka, S. C., Athayde, K. S., & Agarwal, A. (2007). Clinical relevance of oxidative stress and sperm chromatin damage in male infertility: an evidence based analysis. *International Brazilian Journal of Urology*, *33*(5), 603–621.
15. Garrido, N., Meseguer, M., & Simon, C. (2004). Pro-oxidative and anti-oxidative imbalance in human semen and its relation with male fertility. *Asian Journal of Andrology*, *6*(1), 9–65.
16. Lenzi, A., Gandini, L., & Picardo, M. (2000). Lipoperoxidation damage of spermatozoa polyunsaturated fatty acids (PUFA): scavenger mechanisms and possible scavenger therapies. *Frontiers in Bioscience*, *5*, E1–E15.
17. Ohno, K., Ito, M., Ichihara, M., & Ito, M. (2012). Molecular hydrogen as an emerging therapeutic medical gas for neurodegenerative and other diseases. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, *2012*, 353152.
18. Ohsawa, I., Ishikawa, M., Takahashi, K., Watanabe, M., Nishimaki, K., & Yamagata, K. (2007). Hydrogen acts as a therapeutic antioxidant by selectively reducing cytotoxic oxygen radicals. *Nature Medicine*, *13*(6), 688–694.
19. Slezák, J., Kura, B., & Frimmel, J. (2016). Preventive and therapeutic application of molecular hydrogen in situations with excessive production of free radicals. *Physiological Research*, *65*(Suppl. 4), 11–28. https://doi.org/10.33549/physiolres.933414
20. Tremellen, K. (2008). Oxidative stress and male infertility — a clinical perspective. *Human Reproduction Update*, *14*(3), 243–258. EDN: https://elibrary.ru/IPKFAV

References

1. Baimishev, M. Kh., & Baimishev, Kh. B. (2016). Innovative method for increasing natural resistance of cows' organisms before calving. *Modern Innovations*, *6*(8), 42–49. EDN: https://elibrary.ru/WBNZBH
2. Bityukov, E. I., & Minenkov, N. A. (2012). Changes in bactericidal and lysozyme activity of blood serum in different phases of reproduction in cows. *Bulletin of Kursk State Agricultural Academy*, *4*, 55–57. EDN: https://elibrary.ru/ROBSFT
3. Budevich, A. I., & Mordan, G. G. (2002). Improving the technology of artificial insemination of cattle. *Proceedings of the Academy of Agricultural Sciences of the Republic of Belarus. Agricultural Sciences Series*, *3*, 77–79. EDN: https://elibrary.ru/LHSMDO
4. Garkavi, L. Kh., Kvakina, E. B., Kuzmenko, T. S., & Shikhlyarova, A. I. (2002). *Antistress reactions and activation therapy. Activation reaction as a path to*

health through self-organization processes (196 pp.). Yekaterinburg: RIA "Philanthropist". ISBN: 5-901112-10-5. EDN: https://elibrary.ru/XMYPUT

5. GOST 26030-2015. *Reproduction means. Frozen bull semen. Technical specifications* (20 pp.). Moscow: Standartinform.
6. Deryugina, A. V., Ivashchenko, M. N., & Lodyanoi, M. S. (2022). Assessment of membrane resistance in bull spermatozoa during long-term storage. *Natural and Technical Sciences*, *1*(164), 107–109. EDN: https://elibrary.ru/QLDSAO
7. Ivanov, A. I., & Chukhlovin, B. A. (1967). On the method for determining phagocytic and digestive capacity of neutrophils. *Laboratory Practice*, *10*, 610.
8. Ivashchenko, M. N., Deryugina, A. V., Ermokhina, O. N., Ignatiev, P. S., Latushko, M. I., Metelin, V. B., Belov, A. A., & Erzutov, A. I. (2024). Changes in metabolism of native and thawed bull spermatozoa under the influence of molecular hydrogen. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *16*(3), 133–148. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2024-16-3-1152. EDN: https://elibrary.ru/LOCQFZ
9. Kondrakhin, I. P., Arkhipov, A. V., & Levchenko, V. I. (2004). *Methods of veterinary clinical laboratory diagnostics: Reference guide* (520 pp.). Moscow: KolosS. ISBN: 5-9532-0165-6. EDN: https://elibrary.ru/QKWKND
10. Levitskaya, T. T. (2014). Influence of genotype on manifestation of humoral factors of natural resistance. *Proceedings of Orenburg State Agricultural University*, *6*, 85–88. EDN: https://elibrary.ru/SJDSIX
11. *Assessment and correction of nonspecific resistance in animals: Methodological recommendations* (25 pp.). Voronezh: [s. n.]. (Approved by the section "Pathology, Pharmacology and Therapy" of the Veterinary Medicine Department of the Russian Academy of Agricultural Sciences.)
12. Smirnova, Yu. M., Platonov, A. V., & Shamakhov, A. A. (2022). Blood parameters of cows when including a humic acid-based additive in the diet. *Bulletin of KrasSAU*, *8*(185), 100–105. https://doi.org/10.36718/1819-4036-2022-8-100-105. EDN: https://elibrary.ru/CERATW
13. Aktan, G., Dogru Abbasoglu, S., & Kucukgergin, C. (2013). Mystery of idiopathic male infertility: Is oxidative stress an actual risk? *Fertility and Sterility*, *99*(5), 1211–1215.
14. Cocuzza, M., Sikka, S. C., Athayde, K. S., & Agarwal, A. (2007). Clinical relevance of oxidative stress and sperm chromatin damage in male infertility: An evidence-based analysis. *International Brazilian Journal of Urology*, *33*(5), 603–621.
15. Garrido, N., Meseguer, M., & Simon, C. (2004). Pro-oxidative and anti-oxidative imbalance in human semen and its relation with male fertility. *Asian Journal of Andrology*, *6*(1), 9–65.

16. Lenzi, A., Gandini, L., & Picardo, M. (2000). Lipoperoxidation damage of spermatozoa polyunsaturated fatty acids (PUFA): Scavenger mechanisms and possible scavenger therapies. *Frontiers in Bioscience*, *5*, E1–E15.
17. Ohno, K., Ito, M., Ichihara, M., & Ito, M. (2012). Molecular hydrogen as an emerging therapeutic medical gas for neurodegenerative and other diseases. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, *2012*, 353152.
18. Ohsawa, I., Ishikawa, M., Takahashi, K., Watanabe, M., Nishimaki, K., & Yamagata, K. (2007). Hydrogen acts as a therapeutic antioxidant by selectively reducing cytotoxic oxygen radicals. *Nature Medicine*, *13*(6), 688–694.
19. Slezák, J., Kura, B., & Frimmel, J. (2016). Preventive and therapeutic application of molecular hydrogen in situations with excessive production of free radicals. *Physiological Research*, *65*(Suppl. 4), 11–28. https://doi.org/10.33549/physiolres.933414
20. Tremellen, K. (2008). Oxidative stress and male infertility — a clinical perspective. *Human Reproduction Update*, *14*(3), 243–258. EDN: https://elibrary.ru/IPKFAV

ВКЛАД АВТОРОВ

Иващенко М.Н., Дерюгина А.В.: разработка концепции научной работы, составление черновика рукописи.

Ерзутов А.И., Петров В.А., Белов А.А.: сбор и анализ данных, статистическая обработка полученных результатов.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Marina N. Ivashchenko, Anna V. Deryugina: development of the concept of scientific work, drafting of the manuscript.

Alexey I. Erzutov, Vladimir A. Petrov, Andrey A. Belov: data collection and analysis, statistical processing.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Иващенко Марина Николаевна, кандидат биологических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный агротехнологический университет им. Л.Я. Флорентьева»
пр. Гагарина, 97, г. Нижний Новгород, 603107, Российская Федерация
kafedra2577@mail.ru

Дерюгина Анна Вячеславовна, доктор биологических наук, доцент
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследователь-

ский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского"
пр. Гагарина, 23, г. Нижний Новгород, 603022, Российская Федерация
deryugina@ibbm.unn.ru

Ерзутов Алексей Иванович, ветеринарный врач
ООО Племпредприятие «Нижегородское»
ул. Садовая, 135, сп. Опытный, Кстовский муниципальный округ, Нижегородская область, 607686, Российская Федерация
aerzutov@mail.ru

Петров Владимир Александрович, аспирант
ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный агротехнологический университет им. Л.Я. Флорентьева»
пр. Гагарина, 97, г. Нижний Новгород, 603107, Российская Федерация
marina.31@rambler.ru

Белов Андрей Александрович, кандидат биологических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный агротехнологический университет им. Л.Я. Флорентьева»
пр. Гагарина, 97, г. Нижний Новгород, 603107, Российская Федерация
andrey.raven@gmail.com

DATA ABOUT THE AUTHORS

Marina N. Ivashchenko, Cand. of Bio. Sc., Associate Professor
Nizhny Novgorod State Agrotechnological University named after L.Y. Florentyev
97, Gagarin Ave., Nizhny Novgorod, 603107, Russian Federation
SPIN-code: 8510-8676
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6642-8518
kafedra2577@mail.ru

Anna V. Deryugina, Dr. of Bio. Sc., Associate Professor
National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod
23, Gagarin Ave., Nizhny Novgorod, 603022, Russian Federation
SPIN-code: 7974-4600
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8812-8559
deryugina@ibbm.unn.ru

Alexey I. Erzutov, veterinarian
Nizhny Novgorod Enterprise LLC
135, Sadovaya Str., Opytny Settlement, Kstovsky Municipal District, Nizhny Novgorod region, 607686, Russian Federation
SPIN-code: 5401-2678
ORCID: https://orcid.org/0009-0005-6175-4820
aerzutov@mail.ru

Vladimir A. Petrov, PhD student
Nizhny Novgorod State Agrotechnological University named after L.Y. Florentyev ,
97, Gagarin Ave., Nizhny Novgorod, 603107, Russian Federation
SPIN-code: 5979-1111
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9190-0914
marina.31@rambler.ru

Andrey A. Belov, Cand. of Bio. Sc., Associate Professor
Nizhny Novgorod State Agrotechnological University named after L.Y. Florentyev
97, Gagarin Ave., Nizhny Novgorod, 603107, Russian Federation
SPIN-code: 1394-7694
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4869-5054
andrey.raven@gmail.com

Поступила 10.12.2024 Received 10.12.2024
После рецензирования 20.01.2025 Revised 20.01.2025
Принята 01.02.2025 Accepted 01.02.2025

ФИЗИОЛОГИЯ И БИОХИМИЯ РАСТЕНИЙ

PLANT PHYSIOLOGY AND BIOCHEMISTRY

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-4-1212 **EDN: DHPANG**
УДК 631.53:581.143.6

CC BY NC ND

Научная статья

ВЛИЯНИЕ ИОНОВ ЦИНКА И МЕДИ НА МОРФОГЕНЕЗ *ROBINIA PSEUDOACACIA* L. В КУЛЬТУРЕ *IN VITRO*

О.О. Жолобова, Т.В. Терещенко

Аннотация

Обоснование. Модификация состава и концентрации микроэлементов питательной среды дает возможность провести качественную оценку влияния ионов металлов на морфогенный потенциал растений *in vitro*.

Цель. Изучить влияние различных концентраций цинка и меди в культуральной среде на морфогенную активность проростков и растений-регенерантов *Robinia pseudoacacia* для оптимизации технологии микроклонального размножения.

Материалы и методы. Исследование проводилось на базе лаборатории биотехнологий ФНЦ агроэкологии РАН с использованием семенного материала и микропобегов *R. pseudoacacia*. В качестве основной питательной среды использовали протокол Мурасиге и Скуга без добавления фитогормонов. В эксперименте использовали следующие диапазоны концентраций солей цинка и меди: $ZnSO_4 \times 7H_2O$ (от 1,875 до 30 мг/л) и $CuSO_4 \times 5H_2O$ (от 3,75 до 60 мг/л). Оценивали длину побега, количество междоузлий и листьев, длину сформированных корней, окраску листовой пластины. Статистическая обработка данных осуществлялась с помощью пакета прикладных программ Statistica 12 (StatSoft, USA).

Результаты. Определена морфогенная роль ионов цинка и меди в культуральной среде при микроклональном размножении *Robinia pseudoacacia*. Для проростков и микропобегов *R. pseudoacacia* стимулирующее действие

оказала концентрация сульфата цинка 15 мг/ле. Ионы Zn в диапазоне концентраций от 1,875 до 15 мг/л в целом проявляли стимулирующий характер воздействия на процессы гемморизогенеза. Добавление ионов меди в исследуемом диапазоне проявлялось в постепенном угнетении морфогенного потенциала, как проростков, так и культивируемых микропобегов *R. pseudoacacia*. Высокие концентрации сульфата меди 30 и 60 мг/л являлись сублетальными для микропобегов *R. pseudoacacia*.

Заключение. Полученные результаты показывают, что исследованные концентрации ионов цинка могут быть использованы как эффективные стимуляторы морфогенеза *R. pseudoacacia* в культуре *in vitro*.

Ключевые слова: *Robinia pseudoacacia* L.; цинк; медь; морфометрические показатели; *in vitro*

Для цитирования. Жолобова, О. О., & Терещенко, Т. В. (2025). Влияние ионов цинка и меди на морфогенез *Robinia pseudoacacia* L. в культуре *in vitro*. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(4), 25-44. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-4-1212

Original article

INFLUENCE OF ZINC AND COPPER ON THE *IN VITRO* MORPHOGENESIS OF *ROBINIA PSEUDOACACIA* L.

O.O. Zholobova, T.V. Tereshchenko

Abstract

Background. Modification of the composition and concentration of microelements in the nutrient medium makes it possible to qualitatively assess the effect of metal ions on the morphogenic potential of plants *in vitro*.

Purpose. To study the effect of various zinc and copper concentrations in the culture medium on the morphogenic activity of *Robinia pseudoacacia* seedlings and regenerated plants to optimize the technology of microclonal propagation.

Materials and methods. The study was conducted at the Biotechnology Laboratory of the Federal Scientific Center of Agroecology of the Russian Academy of Sciences using *R. pseudoacacia* seed material and microshoots. The Murashige and Skoog protocol without the addition of phytohormones was used as the main nutrient medium. The following ranges of zinc and copper salt concentrations were used in the experiment: ZnSO4×7H2O (from 1.875 to 30

mg/l) and CuSO4×5H2O (from 3.75 to 60 mg/l). The shoot length, number of internodes and leaves, length of formed roots, and color of the leaf blade were estimated. Statistical data processing was performed using the Statistica 12 software package (StatSoft, USA).

Results. The morphogenic role of zinc and copper ions in the culture medium during microclonal propagation of *Robinia pseudoacacia* was determined. For *R. pseudoacacia* seedlings and microshoots, a stimulating effect was exerted by a zinc sulfate concentration of 15 mg/l. Zn ions in the concentration range from 1.875 to 15 mg/l generally showed a stimulating effect on the processes of hemorrhizogenesis. The addition of copper ions in the studied range was manifested in a gradual inhibition of the morphogenic potential of both seedlings and cultivated microshoots of *R. pseudoacacia*. High concentrations of copper sulfate of 30 and 60 mg/l were sublethal for *R. pseudoacacia* microshoots.

Conclusion. The obtained results show that the studied concentrations of zinc ions can be used as effective stimulators of *R. pseudoacacia* morphogenesis *in vitro* culture.

Keywords: *Robinia pseudoacacia L.*; zinc; copper; morphometric parameters; *in vitro*

For citation. Zholobova, O. O., & Tereshchenko, T. V. (2025). Effect of zinc and copper ions on the morphogenesis of *Robinia pseudoacacia* L. *in vitro* culture. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(4), 25-44. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-4-1212

Введение

Среди микроэлементов, оказывающих влияние на рост и развитие растений, особый интерес представляют те металлы, которые являются жизненно необходимыми компонентами питания растений при условии их содержания в незначительных количествах. Когда концентрации биогенных микроэлементов возрастают, они становятся токсичными [12]. Отклик растений на влияние тяжелых металлов зависит от видовой принадлежности, экотипа, стадии роста, концентрации, времени экспозиции и специфически проявляется на различных уровнях организации биологических систем [6].

Культура изолированных тканей и органов растений является уникальной биологической системой и эффективным инструментом для проведения исследований по изучению адаптивных реакций регенерантов в ответ на изменения условий культивирования. Модификация состава и концентрации микроэлементов питательной среды, несмотря на существование

стандартных протоколов, дает возможность провести качественную оценку влияния ионов металлов на рост и развитие растений *in vitro*.

Анализ литературных данных позволяет выделить три основных направления практического использования влияния микроэлементов на морфогенез растений. Самым ранним, наиболее изученным и востребованным является использование достаточно высоких доз (сублетальных и летальных) концентраций подвижных форм тяжелых металлов для получения и селекции генотипов, устойчивых к неблагоприятным воздействиям внешней среды. Так, при изучении влияния токсического действия высоких доз (808-1313 мг/л) цинка (Zn) на жизнеспособность пробирочных растений-регенерантов *Fagopyrum esculentum* Moench удалось получить исходный материал гречихи с использованием селективных сред, перспективный для дальнейшей селекции [2-5].

В своей работе Седов К.А. с соавт. (2012) использовали семена льна многолетнего (*Linum perenne* L.) сорта Синий Шелк и хризантемы килеватой (*Chrysanthemum carinatum* L.) сорта Эльдорадо. После проращивания в асептических условиях культивировали их в течение 14-30 суток при наличии в средах ионов меди в концентрациях от 10 до 100 мг/л. Были определены селективные концентрации меди для каждого вида и предложена схема селекции для получения растений-регенератов, устойчивых к меди [10]. Для микроклонов многолетнего кустарника вейгелы цветущей *Weigela florida* «Variegata» были отработаны этапы скрининга генотипов, адаптированных к условиям засоления и повышенного содержания ионов меди с применением трехступенчатого эксперимента *in vitro* [8].

Проведённые эксперименты по определению диапазонов концентраций тяжелых металлов, при которых они оказывают стимулирующее, нейтральное и угнетающее действие на растения, свидетельствуют о возможности развития второго направления – биотестирования для определения пригодности конкретных растений для фиторемедиации. Реализацию данного направления можно отметить в работе А.А. Ермошина и соавт. (2020), которые изучали показатели роста двух видов бурачка – *Alyssum tortuosum* Waldst. & Kit. Ex Willd. и *Alyssum litvinovii* Knjaz. (гипераккумуляторы никеля), и клевера *Trifolium repens* L. (как космополитного вида), выращенных в асептической культуре в среде с высоким содержанием ионов меди и никеля. Были обнаружены генотипы растений, выживающие на 200 мкМ Cu^{2+} в среде, что может быть перспективно для их использования на почвах с полиметаллическим загрязнением [7].

Третье важное направление – возможность за счет применения умеренных и низких концентраций солей тяжелых металлов добиваться ускорения и улучшения морфометрических показателей на отдельных этапах культивирования растений. Так, при концентрации сульфата цинка в среде, равной 0,04 мМ происходило увеличение длины 9-дневных проростков *Cyamopsis tetragonoloba* (L.) Taub. [20]. В опытах с растениями ячменя (*Hordeum vulgare* L.) наибольший стимулирующий эффект наблюдали в присутствии 0,15 мМ сульфата цинка в среде [17]. Также отмечено стимулирующее влияние цинка (0,005 мМ) на длину корня кукурузы [16]. Изучена морфогенная роль меди и цинка при микроклональном размножении важного лекарственного кустарника *Rauvolfia serpentina* (L.) Benth. и финиковой пальмы *Phoenix dactylifera* L. [13; 23].

Таким образом, исследование влияния различных доз тяжелых металлов в культуре *in vitro* перспективно как для реализации селекционных программ и фиторемедиации, так и для улучшения всхожести семян, скорости вегетативного роста и индукции ризогенеза *in vitro*.

Проблемы аридизации климата и опустынивания территорий, деградации и разрушения почв ставят первостепенными проекты по выведению новых стрессоустойчивых генотипов древесных пород для создания системы защитных лесных насаждений. *Robinia pseudoacacia* L. является одной из наиболее ценных и быстрорастущих лесообразующих пород для условий полупустыни, отличающаяся такими биологическими особенностями как: засухоустойчивость, солеустойчивость и скорость роста [1]. Разработка технологии микроклонального размножения данного вида позволит массово получать ценные генотипы для проведения агролесомелиоративных мероприятий и реализации ускоренного селекционного процесса в культуре изолированных тканей.

Цель исследования – изучить влияние различных концентраций цинка и меди в культуральной среде на морфогенную активность проростков и растений-регенерантов *Robinia pseudoacacia* для оптимизации технологии микроклонального размножения.

Материалы и методы

Работа проводилась на базе молодежной лаборатории биотехнологий ФНЦ агроэкологии РАН в течение 2022-2023 г. Семенной материал *R. pseudoacacia* был собран с коллекционного участка в сухой степи семеноводческого комплекса в Кировском лесничестве г. Волгоград, где содер-

жится архив отобранных генотипов, перспективных для лесоразведения в засушливом регионе (кадастровый номер 34:26:050301:104).

Семена *R. pseudoacacia* предварительно скарифицировали: ошпаривали горячей водой (90°С) и оставляли до полного ее остывания. При введении в асептическую культуру семена погружали на 1 минуту в 70% спирт, затем промывали стерильной дистиллированной водой и выдерживали в 7% растворе «Лизоформин 3000» (глутаровый альдегид 9,5%) в течение 10 минут, после чего 3–4 раза промывали в воде и помещали на питательные среды. Энергию прорастания фиксировали на 5 день, всхожесть на 12 день. На 20 день оценивали морфометрические показатели проростков.

В качестве основной питательной среды использовали протокол Мурасиге и Скуга [21], дополненный сахарозой (30 г/л) и агаром (7 г/л), содержание $ZnSO_4 \times 7H_2O$ в котором составляет 8,6 мг/л, а $CuSO_4 \times 5H_2O$ 0,025 мг/л (контроль). В эксперименте использовали следующие концентрации солей цинка и меди, которые были добавлены к основному протоколу: $ZnSO_4 \times 7H_2O$ (Zn 1,875 мг/л; Zn 3,75 мг/л; Zn 7,5 мг/л; Zn 15 мг/л; Zn 30 мг/л) и $CuSO_4 \times 5H_2O$ (Cu 3,75 мг/л; Cu 7,5 мг/л; Cu 15 мг/л; Cu 30 мг/л; Cu 60 мг/л).

В эксперименте использовали сегменты побегов 1,5–2,0 см с двумя междоузлиями, которые помещали в биологические пробирки с 15 мл питательной среды. Растения культивировали на фитостеллажах (СТЕЛЛАР-ФИТО LINE, Россия) в течение 45 дней при температуре 22–24°С, интенсивность освещения 70–85 мкмоль $м^{-2}$ $с^{-1}$, фотопериод 16 часов. Исследование проводили в трехкратной повторности, для каждой концентрации анализировали по 30 эксплантов. Оценивали следующие морфологические показатели: длину побега, количество междоузлий и листьев, длину сформированных корней, окраску листовой пластины.

Результаты статистически обработаны с использованием программы Statistica 12 компании StatSoft Inc. и представлены в виде средней арифметической с учетом ошибки среднего. Сравнение полученных результатов между собой проводили по LSD Post Hoc тесту. Статистически значимыми считали различия при $p<0,05$.

Результаты и обсуждение

Семена *R. pseudoacacia* после предварительной скарификации начали прорастать в культуре *in vitro* на второй день. Увеличение концентрации цинка или меди в питательных средах не имело значительного влияния ни на энергию прорастания, значение которой находилось в пределах 50–75%, ни на всхожесть (65–90%). Максимальные значения всхожести отмечались

на средах с содержанием Zn 1,875 мг/л и Cu 60 мг/л, но статистически значимых различий по сравнению с контролем и другими экспериментальными средами зафиксировано не было (рис. 1).

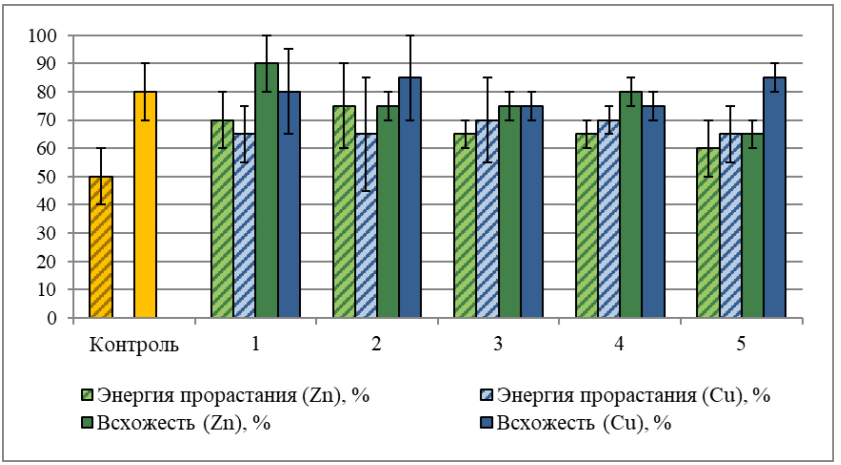


Рис. 1. Энергия прорастания и всхожесть *Robinia pseudoacacia* на питательных средах с металлами по сравнению с контролем

Примечание: Контроль представлен показателями энергии прорастания в % (штриховка) и всхожестью в %; 1 – концентрация Zn 1,875 мг/л, Cu 3,75 мг/л; 2 – Zn 3,75 мг/л, Cu 7,5 мг/л; 3 – Zn 7,5 мг/л, Cu 15 мг/л; 4 – Zn 15 мг/л, Cu 30 мг/л; 5 – Zn 30 мг/л, Cu 60 мг/л.

Несмотря на хорошие посевные качества семенного материала, отличающиеся высокими показателями энергии прорастания и всхожестью, увеличение в питательных средах концентрации цинка и меди оказывало влияние на реализацию ростового потенциала и морфометрические показатели проростков *R. pseudoacacia*, которые были зафиксированы на 20 день после появления первых всходов (таблица 1).

Исследуемый диапазон концентраций цинка оказывал положительное влияние на морфометрические показатели проростков, длина гипокотиля и эпикотиля на контроле и повышенных концентрациях цинка 15 и 30 мг/л статистически значимо не различались и имели максимальные значения. Показатели общей длины проростков *R. pseudoacacia* находились в пределах от 7,83 см (контроль) и 8,83 см (Zn 30 мг/л), понижение значений этого параметра были отмечены только на двух экспериментальных средах с Zn 1,875 и 3,75 мг/л.

Таблица 1.

Морфометрические показатели проростков *Robinia pseudoacacia*

Вариант	Длина гипокотиля, см	Длина эпикотиля, см	Длина корня, см	Общая длина проростка, см
Цинк ($ZnSO_4 \times 7H_2O$)				
Контроль	1,90 ± 0,21 аб	3,57 ± 0,29 а	2,36 ± 0,24 бв	7,83 ± 0,74 аб
30 мг/л	2,24 ± 0,23 а	3,61 ± 0,33 а	2,98 ± 0,49 б	8,83 ± 1,05 а
15 мг/л	1,87 ± 0,13 аб	2,79 ± 0,24 аб	3,30 ± 0,42 аб	7,96 ± 0,79 аб
7,5 мг/л	2,03 ± 0,22 аб	2,46 ± 0,27 б	4,21 ± 0,55 а	8,70 ± 1,04 аб
3,75 мг/л	1,91 ± 0,16 аб	2,56 ± 0,25 б	2,48 ± 0,31 бв	6,95 ± 0,72 бв
1,875 мг/л	1,59 ±0,14 б	2,41 ± 0,36 б	1,57 ± 0,20 в	5,57 ± 0,70 в
Медь ($CuSO_4 \times 5H_2O$)				
Контроль	1,90 ± 0,21 а	3,57 ± 0,29 а	2,36 ± 0,24 б	7,83 ± 0,74 аб
60 мг/л	1,33 ± 0,08 г	1,96 ± 0,28 в	0,50 ± 0,04 в	3,98 ± 0,40 д
30 мг/л	1,36 ± 0,08 вг	2,85 ± 0,20 бв	1,12 ± 0,09 в	5,33 ± 0,37 г
15 мг/л	1,48 ± 0,17 бвг	2,50 ± 0,23 бв	2,07 ± 0,22 б	6,05 ± 0,62 вг
7,5 мг/л	1,78 ± 0,16 абв	2,42 ± 0,19 бв	2,23 ± 0,35 б	6,43 ± 0,70 бв
3,75 мг/л	1,82 ± 0,15 аб	2,97 ± 0,24 аб	3,61 ± 0,42 а	8,40 ± 0,81 а

Примечание: в таблице представлены средние значения ± ошибка среднего, различные буквы (здесь и далее) в столбце означают статистические различия согласно LSD Post Hoc тесту при $p < 0,05$.

Цинк в концентрациях 7,5 и 15 мг/л оказывал положительное влияние на развитие зародышевого корешка и формирование разветвленной корневой системы, длина которой составила 4,21 и 3,30 см, данные значения были на 44 и 29% выше контроля (рис. 2 а, е).

В работах Mangal et al. (2013) было отмечено негативное влияние на длину корня и побега проростков бамии и ластерной фасоли при концентрации 0,17 мМ сульфата цинка [19]. Для проростков *R. pseudoacacia* концентрация цинка в этом диапазоне также снижала ростовые показатели длины проростка и его корня. Возрастание концентрации ионов цинка до 2,1 мМ оказывало ингибирующее действие на размеры проростков томатов [14], что не согласуется с результатами нашего эксперимента и указывает, прежде всего, на видоспецифичность реакции исследуемых растений. Для *Pisum sativum* L. стимулирующие концентрации ионов цинка были ограничены пределами 0,02 – 0,2 мМ. Присутствие возрастающих концентраций

сульфата цинка в среде (до 10мМ) приводило к незначительному снижению прорастания семян и находилось в пределах ошибки измерения [9].



Рис. 2. Проростки *Robinia pseudoacacia* на экспериментальных питательных средах: a – контроль, b – Cu 15 мг/л, c – Cu 60 мг/л, d – Zn 3,75 мг/л, e – Zn 15 мг/л, f – Zn 30 мг/л

Добавление ионов меди в питательную среду в количестве 3,75 мг/л стимулировало развитие корневой системы у проростков *R. pseudoacacia*, данный показатель превосходил контроль в 1,5 раза и был максимальным среди всех экспериментальных сред. Остальные показатели длины проростков не имели значимых различий с контролем. С увеличением концентрации меди прослеживалась обратная зависимость по всем показателям в сторону уменьшения. Токсическое действие меди на проростки, проявляющееся в утолщении основного корня, подавлении образования корневых волосков и хлорозе формирующихся настоящих листьев эпикотиля, отмечено при концентрации 60 мг/л $CuSO_4$ (рис. 2 a, b, c). Схожие процессы по морфометрическим показателям проростков *Alisma gramineum* и *Rumex maritimus* были отмечены в работе Тимофе-

евой с соавторами при изучении действия ионов меди в концентрациях 50 и 100 мг/л [11].

Морфометрические характеристики проростков *R. pseudoacacia* были не так чувствительны к добавлению ионов цинка в питательные среды по сравнению с культивированием микропобегов на экспериментальных средах с такими же концентрациями сульфата цинка (рис. 3). После 6 недель культивирования длина побега была максимальной при концентрации цинка 15 мг/л и превышала контроль в 1,7 раз. Минимальные значения этого показателя были отмечены на контроле и средах с незначительным увеличением концентраций цинка 1,875 и 3,75 мг/л. У микрорастений *R. pseudoacacia* на всех вариантах исследуемых концентраций отмечались процессы ризогенеза в 80 – 90 % случаях. При этом длина и количество корней второго порядка были максимальными при концентрации Zn 15 мг/л. Стимулирующее влияние на формирование и развитие корневой системы было зафиксировано в диапазоне концентраций ионов цинка от 1,875 до 15 мг/л. Это связано с участием цинка (в составе ферментов) в синтезе триптофана, прямого предшественника индолилуксусной кислоты, входящую в группу гормонов ауксинов, стимулирующих индукцию ризогенеза [12]. На контроле и концентрации цинка 30 мг/л длина корней была минимальная. В контрольной группе отмечались процессы каллусогенеза у основания побега, что в дальнейшем затруднит переход *ex vitro* (рис. 3, 4 d, e, f).

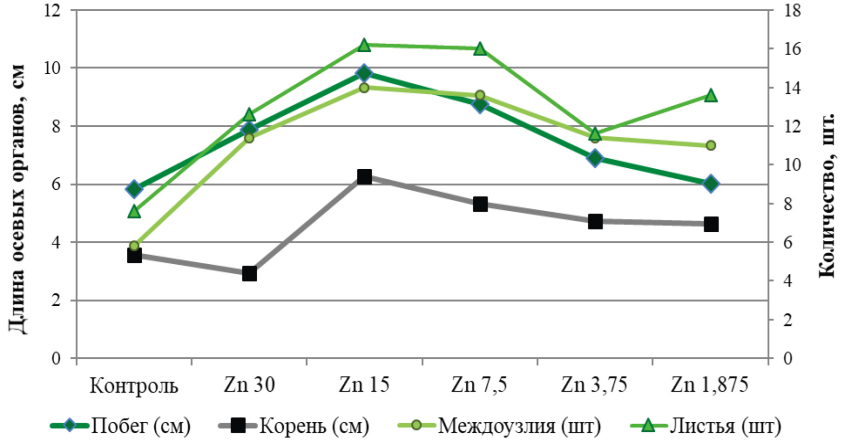


Рис. 3. Морфометрические показатели микропобегов *Robinia pseudoacacia* на питательных средах, дополненных ионами цинка

Вариант	Длина побега, см	Длина корней, см	Количество междоузлий, шт.	Количество листьев, шт.
Контроль	5,84 ± 0,80 в	3,55 ± 1,09 бв	5,80 ± 0,80 б	7,60 ± 0,81 в
Zn 30 мг/л	7,88 ± 0,37 абв	2,94 ± 0,58 в	11,40 ± 1,12 а	12,60 ± 0,60 аб
Zn 15 мг/л	9,84 ± 1,21 а	6,28 ± 0,49 а	14,00 ± 2,88 а	16,20 ± 2,52 а
Zn 7,5 мг/л	8,75 ± 0,54 аб	5,31 ± 0,29 аб	13,60 ± 1,21 а	16,00 ± 1,22 аб
Zn 3,75 мг/л	6,90 ± 1,03 бв	4,73 ± 0,69 абв	11,40 ± 2,23 а	11,60 ± 1,96 бв
Zn 1,875 мг/л	6,02 ± 0,31 в	4,64 ± 0,99 абв	11,00 ± 1,26 а	13,60 ± 1,21 аб

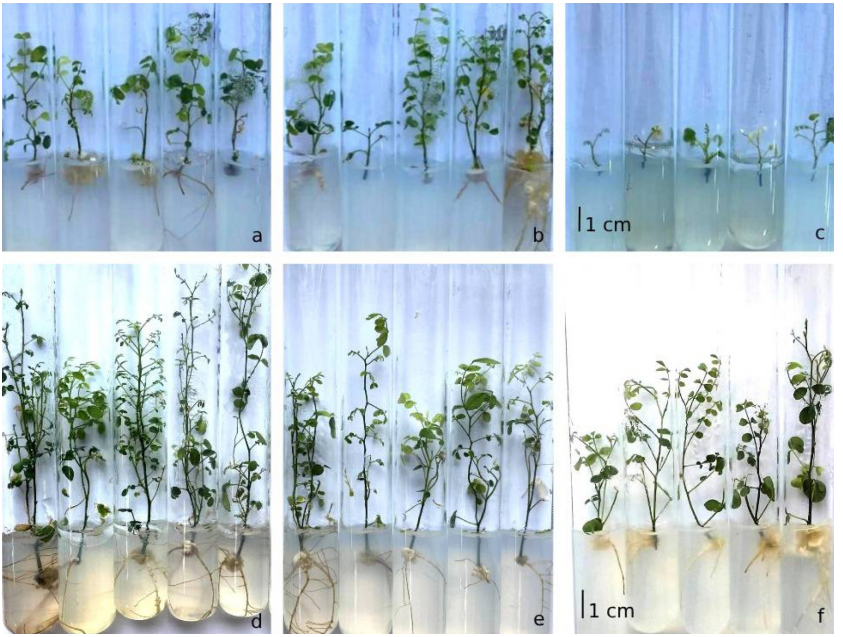


Рис. 4. Микропобеги *Robinia pseudoacacia* на экспериментальных питательных средах: a – Cu 3,75 мг/л, b – Cu 15 мг/л, c – Cu 60 мг/л, d – Zn 15 мг/л, e – Zn 30 мг/л, f – контроль

Активное наращивание вегетативной массы происходило на средах с добавлением цинка. Максимальные значения по количеству междоузлий, листьев и количеству новых побегов отмечалось при концентрации Zn

15 мг/л (рис. 3, 4). По отношению к контрольной группе на всех экспериментальных вариантах с цинком данные параметры были улучшены, однако при максимальной концентрации ионов цинка в 30 мг/л верхушки растений-регенерантов были подвержены хлорозу. Этот процесс характерен при снижении уровня пигментов хлорофилла, приводящих к хлорозу молодых листьев, при повышении уровня Zn и проявлению его токсичности, способствующей быстрому старению и сокращению биомассы растений [18].

Сравнительная характеристика морфометрических показателей микропобегов *R. pseudoacacia* на экспериментальных средах, дополненных ионами меди, и контрольной группой указывает на угнетающее воздействие меди, причем ингибирование усиливается при увеличении концентрации. Схожие результаты были получены при изучении влияния меди на прорастание и рост *Cyperus esculentus* L. [22]. Максимальные значения для *R. pseudoacacia* по всем морфометрическим показателям были отмечены на контроле (рис. 5). При низких значениях Cu в диапазоне от 3,75 до 15 мг/л ростовые показатели снижались по мере возрастания концентрации, но при этом находились в пределах допустимых значений по отношению к контрольной группе. При этом токсическое влияние ионов меди проявлялось в наличии хлороза молодых верхушечных листьев и утолщении формировавшихся корней на фоне общего снижения количества укорененных эксплантов (рис. 4 a, b).

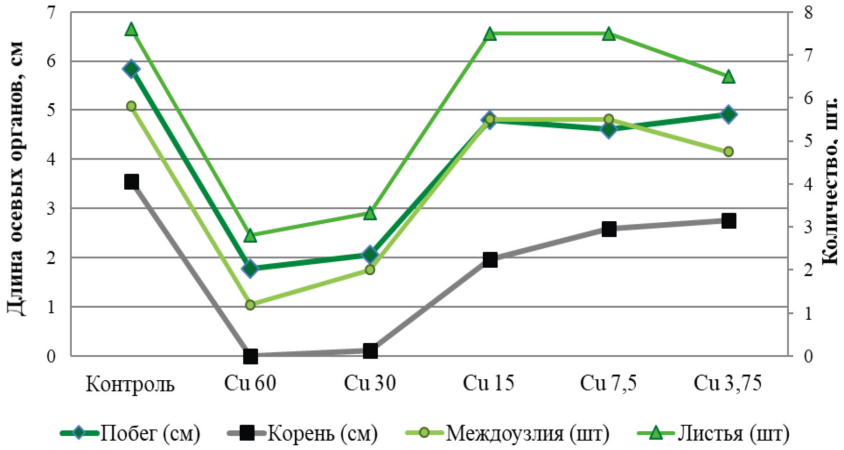


Рис. 5. Морфометрические показатели микропобегов *Robinia pseudoacacia* на питательных средах, дополненных ионами меди

Вариант	Длина побега, см	Длина корней, см	Количество междоузлий, шт.	Количество листьев, шт.
Контроль	5,84 ± 0,80 а	3,55 ± 1,09 а	5,80 ± 0,80 а	7,60 ± 0,81 а
Cu 60 мг/л	1,77 ± 0,24 б	0,00 ± 0,00 в	1,20 ± 0,20 б	2,80 ± 0,37 б
Cu 30 мг/л	2,06 ± 0,12 б	0,12 ± 0,12 бв	2,00 ± 0,12 б	3,33 ± 0,67 б
Cu 15 мг/л	4,80 ± 0,51 а	1,97 ± 1,01 абв	5,50 ± 0,65 а	7,50 ± 0,50 а
Cu 7,5 мг/л	4,62 ± 0,67 а	2,60 ± 0,75 абв	5,50 ± 0,50 а	7,50 ± 0,50 а
Cu 3,75 мг/л	4,91 ± 0,57 а	2,76 ± 1,28 аб	4,75 ± 0,85 а	6,50 ± 0,87 а

Концентрации ионов меди 30 и 60 мг/л являлись сублетальными для микропобегов *R. pseudoacacia*. Все ростовые показатели были снижены в 3–5 раз по отношению к контролю. Прирост побега и формирование новых листовых пластин практически отсутствовали и оставались на уровне первичного экспланта, субкультивируемого на питательную среду с высокими концентрациями Cu. Наблюдалось полное отсутствие корней и наличие хлороза (рис. 5 c, f). В исследованиях Bojarczuk K. высокие концентрации меди также подавляли развитие побегов и корней у отобранных клонов тополя [15]. Избыток меди вызывает угнетение роста, хлороз листьев, утолщение основного корня и подавление образования корневых волосков [17]. При сублетальных концентрациях меди происходила полная остановка развития микропобегов *R. pseudoacacia* и отсутствие процессов гемморизогенеза.

Заключение

В результате проведенных исследований определена морфогенная роль ионов цинка и меди в культуральной среде при микроклональном размножении *Robinia pseudoacacia*, перспективной для защитного лесоразведения в условиях засушливого климата. Для проростков и микропобегов *R. pseudoacacia* стимулирующее действие оказала концентрация сульфата цинка 15 мг/л в питательной среде Мурасиге и Скуга, что привело к максимальной длине побегов 9,84 ± 1,21 см и развитию корневой системы (6,28 ± 0,49 см), формированию новых побегов и увеличению количества междоузлий и листьев. Ионы Zn в диапазоне концентраций от 1,875 до 15 мг/л в целом проявляли стимулирующий характер воздействия на процессы морфогенеза *R. pseudoacacia*. Однако более высокая концентрация цинка 30 мг/л оказывала отрицательное влияние на микропобеги, которое проявлялось в хлорозе верхушечных листьев и снижении ростовых показателей.

Добавление ионов меди в исследуемом диапазоне от 3,75 до 60 мг/л проявлялось в постепенном угнетении морфогенного потенциала, как проростков, так и культивируемых микропобегов *R. pseudoacacia.* Токсическое действие избыточного содержания меди проявлялось в хлорозе листовых пластин, снижении количества укорененных эксплантов, утолщении основного корня и подавлении образования корней второго порядка и корневых волосков. Высокие концентрации сульфата меди 30 и 60 мг/л являлись сублетальными для микропобегов *R. pseudoacacia,* происходила полная остановка процессов гемморизогенеза.

Полученные результаты показывают, что исследованные концентрации ионов цинка могут быть использованы как эффективные стимуляторы морфогенеза *R. pseudoacacia* в культуре *in vitro* для оптимизации технологии микроклонального размножения и реализации селекционных программ данного вида.

Информация о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация о спонсорстве. Работа выполнена в рамках Государственного задания научно-исследовательской работы ФНЦ агроэкологии РАН No 122020100427-1 «Разработать научные основы сохранения и воспроизводства ценных генотипов древесных и кустарниковых растений в культуре in vitro».

Список литературы

1. Бабошко, О. И., & Танюкевич, В. В. (2015). *Продуктивность и мелиоративная роль лесных полос с участием Robinia pseudoacacia L. в степной зоне* (108 с.). Новочеркасск: Новочеркасская государственная мелиоративная академия.
2. Барсукова, Е. Н., Клыков, А. Г., Фисенко, П. В., Боровая, С. А., & Чайкина, Е. Л. (2020). Использование методов биотехнологии в селекции гречихи на Дальнем Востоке. *Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук*, *4*, 58–66. https://doi.org/10.37102/08697698.2020.212.4.010. EDN: https://elibrary.ru/WDMMAU
3. Барсукова, Е. Н., Клыков, А. Г., & Чайкина, Е. Л. (2023). Селекционная оценка сортообразцов гречихи посевной (*Fagopyrum esculentum* Moench), полученных с использованием ионов меди и цинка. *Аграрная наука*, *9*, 84–89. https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-374-9-84-89. EDN: https://elibrary.ru/BDEVXM

4. Боровая, С. А., Барсукова, Е. Н., & Клыков, А. Г. (2022). Влияние селективных сред с тяжёлыми металлами на рост и развитие *Fagopyrum esculentum* Moench in vitro. *Вестник КрасГАУ*, *7*, 95–101. https://doi.org/10.36718/1819-4036-2022-7-95-101. EDN: https://elibrary.ru/GSBMOF
5. Боровая, С. А., Клыков, А. Г., & Барсукова, Е. Н. (2023). Влияние токсического действия цинка и минерального голодания на рост и развитие гречихи посевной в культуре in vitro. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*, *184*(2), 9–18. https://doi.org/10.30901/2227-8834-2023-2-9-18. EDN: https://elibrary.ru/OXMCGJ
6. Дроздова, И. В., Алексеева-Попова, Н. В., Беляева, А. И., & Калимова, И. Б. (2014). Влияние меди, никеля и кадмия на рост и некоторые физиологические параметры сеянцев *Pinus sylvestris* и *Picea abies* (Pinaceae). *Растительные ресурсы*, *50*(4), 554–566. EDN: https://elibrary.ru/STDJWN
7. Ермошин, А. А., Орлова, М. В., Неугодникова, Е. А., Григорьева, Е. И., Тептина, А. Ю., & Киселёва, И. С. (2020). Рост клевера и бурачка in vitro в среде с высоким содержанием тяжёлых металлов. *Экобиотех*, *3*(2), 253–260. https://doi.org/10.31163/2618-964X-2020-3-2-253-260. EDN: https://elibrary.ru/QVFBTY
8. Землянухина, О. А., Калаев, В. Н., Воронина, В. С., & Епринцев, А. Т. (2017). Биохимическая адаптация микроклонов *Weigela florida* «Variegata» Bunge A. DC. к соле- и медьиндуцированным стрессам. *Сибирский лесной журнал*, *6*, 89–101. https://doi.org/10.15372/SJFS20170607. EDN: https://elibrary.ru/YMADDU
9. Минайчев, В. В., Сиголаева, Т. Е., Кузнецов, Д. А., & Иванищев, В. В. (2015). Влияние ионов цинка и никеля на формирование проростков *Pisum sativum* L. *Известия Тульского государственного университета. Естественные науки*, *3*, 292–304. EDN: https://elibrary.ru/UMEKSZ
10. Седов, К. А., Литвинова, И. И., & Гладков, Е. А. (2012). Оценка фитотоксичности меди и получение стресс-устойчивых двудольных растений. *Известия МГТУ*, *2*, 273–276. EDN: https://elibrary.ru/PVDJRT
11. Тимофеева, Н. А., Сигарева, Л. Е., Крылова, Е. Г., & Лапиров, А. Г. (2016). Влияние ионов меди и никеля на морфофизиологические показатели проростков прибрежно-водных растений. *Известия Российской академии наук. Серия биологическая*, *3*, 295–302. https://doi.org/10.7868/S0002332916030115. EDN: https://elibrary.ru/VYLTFT
12. Титов, А. Ф., Казнина, Н. М., & Таланова, В. В. (2014). *Тяжёлые металлы и растения* (194 с.). Петрозаводск: Карельский научный центр РАН. EDN: https://elibrary.ru/UAJSQV

13. Ahmad, N., Alatar, A. A., Faisal, M., Khan, M. I., Fatima, N., Anis, M., et al. (2015). Effect of copper and zinc on the in vitro regeneration of *Rauvolfia serpentina*. *Biologia Plantarum*, *59*(11), 11–17. https://doi.org/10.1007/s10535-014-0479-5
14. Ashagre, H., Almaw, D., & Feyisa, T. (2013). Effect of copper and zinc on seed germination, phytotoxicity, tolerance and seedling vigor of tomato (*Lycopersicon esculentum* L. cultivar Roma VF). *International Journal of Agricultural Science Research*, *2*(11), 312–317.
15. Bojarczuk, K. (2004). Effect of toxic metals on the development of poplar (*Populus tremula* L. × *P. alba* L.) cultured in vitro. *Polish Journal of Environmental Studies*, *13*(2), 115–120.
16. Dikkaya, E. T., & Ergun, N. (2014). Effects of cadmium and zinc interactions on growth parameters and activities of ascorbate peroxidase on maize (*Zea mays* L. MAT 97). *European Journal Experimental Biology*, *4*(1), 288–295.
17. González, Á., Chumillas, V., & del Carmen Lobo, M. (2012). Effect of Zn, Cd and Cr on growth, water status and chlorophyll content of barley plants (*Hordeum vulgare* L.). *Agricultural Sciences*, *3*(4), 572–581. https://doi.org/10.4236/as.2012.34069
18. Goyal, D., Yadav, A., Prasad, M., Singh, T. B., Shrivastav, P., Ali, A., Kumar, D. P., & Mishra, S. (2020). Effect of heavy metals on plant growth: an overview: Contaminants in agriculture (pp. 79–101). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-41552-5_4. EDN: https://elibrary.ru/GZRKCE
19. Mangal, M., Agarwal, M., & Bhargava, D. (2013). Effect of cadmium and zinc on growth and biochemical parameters of selected vegetables. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, *2*(1), 110–114.
20. Manivasagaperumal, R., Balamurugan, S., Thiyagarajan, G., & Sekar, J. (2011). Effect of zinc on germination, seedling growth and biochemical content of cluster bean (*Cyamopsis tetragonoloba* (L.) Taub). *Current Botany*, *2*(5), 11–15.
21. Murashige, T., & Skoog, F. A. (1962). A revised medium for rapid growth and bioassays with tobacco tissue cultures. *Physiologia Plantarum*, *15*(3), 473–497. https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1962.tb08052.x
22. Vwioko, E. D., & Digwe, K. C. (2018). Comparing effects of copper and chromium treatments on growth of *Cyperus esculentus* L. in field and in vitro studies and further explanation by restriction fragment length polymorphism analysis. *East African Journal of Sciences*, *12*(1), 41–50.
23. Zayed, Z. E., EL-Dawayati, M. M., Hussien, F. A., & Saber, T. Y. (2020). Enhanced in vitro multiplication and rooting of date palm cv. Yellow Maktoum by zinc and copper ions. *Plant Archives*, *20*(1), 517–528.

References

1. Baboshko, O. I., & Tanyukevich, V. V. (2015). *Productivity and ameliorative role of forest belts with Robinia pseudoacacia L. in the steppe zone* (108 pp.). Novocherkassk: Novocherkassk State Amelioration Academy.
2. Barsukova, E. N., Klykov, A. G., Fisenko, P. V., Borovaya, S. A., & Chaikina, E. L. (2020). Application of biotechnology methods in buckwheat breeding in the Far East. *Bulletin of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences*, *4*, 58–66. https://doi.org/10.37102/08697698.2020.212.4.010. EDN: https://elibrary.ru/WDMMAU
3. Barsukova, E. N., Klykov, A. G., & Chaikina, E. L. (2023). Breeding evaluation of buckwheat cultivars (Fagopyrum esculentum Moench) obtained using copper and zinc ions. *Agrarian Science*, *9*, 84–89. https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-374-9-84-89. EDN: https://elibrary.ru/BDEVXM
4. Borovaya, S. A., Barsukova, E. N., & Klykov, A. G. (2022). Effect of selective media with heavy metals on the growth and development of Fagopyrum esculentum Moench in vitro. *Bulletin of KrasSAU*, *7*, 95–101. https://doi.org/10.36718/1819-4036-2022-7-95-101. EDN: https://elibrary.ru/GSBMOF
5. Borovaya, S. A., Klykov, A. G., & Barsukova, E. N. (2023). Effect of zinc toxicity and mineral starvation on the growth and development of common buckwheat in in vitro culture. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*, *184*(2), 9–18. https://doi.org/10.30901/2227-8834-2023-2-9-18. EDN: https://elibrary.ru/OXMCGJ
6. Drozdova, I. V., Alekseeva-Popova, N. V., Belyaeva, A. I., & Kalimova, I. B. (2014). Effect of copper, nickel, and cadmium on the growth and some physiological parameters of Pinus sylvestris and Picea abies (Pinaceae) seedlings. *Plant Resources*, *50*(4), 554–566. EDN: https://elibrary.ru/STDJWN
7. Ermoshin, A. A., Orlova, M. V., Neugodnikova, E. A., Grigorieva, E. I., Teptina, A. Yu., & Kiseleva, I. S. (2020). Growth of clover and bugloss in vitro in a medium with high content of heavy metals. *Ecobiotech*, *3*(2), 253–260. https://doi.org/10.31163/2618-964X-2020-3-2-253-260. EDN: https://elibrary.ru/QVFBTY
8. Zemlyanukhina, O. A., Kalaev, V. N., Voronina, V. S., & Yeprintsev, A. T. (2017). Biochemical adaptation of Weigela florida «Variegata» Bunge A. DC. microclones to salt and copper-induced stresses. *Siberian Journal of Forest Science*, *6*, 89–101. https://doi.org/10.15372/SJFS20170607. EDN: https://elibrary.ru/YMADDU
9. Minaychev, V. V., Sigolaeva, T. E., Kuznetsov, D. A., & Ivanishchev, V. V. (2015). Effect of zinc and nickel ions on the formation of Pisum sativum L. seedlings. *Proceedings of Tula State University. Natural Sciences*, *3*, 292–304. EDN: https://elibrary.ru/UMEKSZ

10. Sedov, K. A., Litvinova, I. I., & Gladkov, E. A. (2012). Assessment of copper phytotoxicity and production of stress-resistant dicotyledonous plants. *Proceedings of MSTU*, *2*, 273–276. EDN: https://elibrary.ru/PVDJRT
11. Timofeeva, N. A., Sigareva, L. E., Krylova, E. G., & Lapirova, A. G. (2016). Effect of copper and nickel ions on morphophysiological parameters of littoral aquatic plant seedlings. *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Biological Series*, *3*, 295–302. https://doi.org/10.7868/S0002332916030115. EDN: https://elibrary.ru/VYLTFT
12. Titov, A. F., Kaznina, N. M., & Talanova, V. V. (2014). *Heavy metals and plants* (194 pp.). Petrozavodsk: Karelian Research Centre of the RAS. EDN: https://elibrary.ru/UAJSQV
13. Ahmad, N., Alatar, A. A., Faisal, M., Khan, M. I., Fatima, N., Anis, M., et al. (2015). Effect of copper and zinc on the in vitro regeneration of *Rauvolfia serpentina*. *Biologia Plantarum*, *59*(11), 11–17. https://doi.org/10.1007/s10535-014-0479-5
14. Ashagre, H., Almaw, D., & Feyisa, T. (2013). Effect of copper and zinc on seed germination, phytotoxicity, tolerance and seedling vigor of tomato (*Lycopersicon esculentum* L. cultivar Roma VF). *International Journal of Agricultural Science Research*, *2*(11), 312–317.
15. Bojarczuk, K. (2004). Effect of toxic metals on the development of poplar (*Populus tremula* L. × *P. alba* L.) cultured in vitro. *Polish Journal of Environmental Studies*, *13*(2), 115–120.
16. Dikkaya, E. T., & Ergun, N. (2014). Effects of cadmium and zinc interactions on growth parameters and activities of ascorbate peroxidase on maize (*Zea mays* L. MAT 97). *European Journal Experimental Biology*, *4*(1), 288–295.
17. González, Á., Chumillas, V., & del Carmen Lobo, M. (2012). Effect of Zn, Cd and Cr on growth, water status and chlorophyll content of barley plants (*Hordeum vulgare* L.). *Agricultural Sciences*, *3*(4), 572–581. https://doi.org/10.4236/as.2012.34069
18. Goyal, D., Yadav, A., Prasad, M., Singh, T. B., Shrivastav, P., Ali, A., Kumar, D. P., & Mishra, S. (2020). Effect of heavy metals on plant growth: an overview: Contaminants in agriculture (pp. 79–101). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-41552-5_4. EDN: https://elibrary.ru/GZRKCE
19. Mangal, M., Agarwal, M., & Bhargava, D. (2013). Effect of cadmium and zinc on growth and biochemical parameters of selected vegetables. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, *2*(1), 110–114.
20. Manivasagaperumal, R., Balamurugan, S., Thiyagarajan, G., & Sekar, J. (2011). Effect of zinc on germination, seedling growth and biochemical content of cluster bean (*Cyamopsis tetragonoloba* (L.) Taub). *Current Botany*, *2*(5), 11–15.

21. Murashige, T., & Skoog, F. A. (1962). A revised medium for rapid growth and bioassays with tobacco tissue cultures. *Physiologia Plantarum*, *15*(3), 473–497. https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1962.tb08052.x
22. Vwioko, E. D., & Digwe, K. C. (2018). Comparing effects of copper and chromium treatments on growth of *Cyperus esculentus* L. in field and in vitro studies and further explanation by restriction fragment length polymorphism analysis. *East African Journal of Sciences*, *12*(1), 41–50.
23. Zayed, Z. E., EL-Dawayati, M. M., Hussien, F. A., & Saber, T. Y. (2020). Enhanced in vitro multiplication and rooting of date palm cv. Yellow Maktoum by zinc and copper ions. *Plant Archives*, *20*(1), 517–528.

ВКЛАД АВТОРОВ

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку статьи для публикации.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

The authors contributed equally to this article.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Жолобова Ольга Олеговна, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник – заведующий лабораторией биотехнологий
ФГБНУ «Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук»
пр. Университетский, 97, г. Волгоград, 400062, Российская Федерация
zholobova-o@vfanc.ru

Терещенко Татьяна Васильевна, младший научный сотрудник лаборатории биотехнологий
ФГБНУ «Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук»
пр. Университетский, 97, г. Волгоград, 400062, Российская Федерация
tereschenko@vfanc.ru

DATA ABOUT THE AUTHORS

Olga O. Zholobova, Candidate of Biological Sciences, Leading Researcher – Head of the Biotechnology Laboratory

Federal State Budgetary Institution "Federal Scientific Center of Agroecology, Complex Melioration and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences"
97, Universitetskiy Prospekt, Volgograd, 400062, Russian Federation
zholobova-o@vfanc.ru
SPIN-code: 7730-9448
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1594-4181
ResearcherID: AAO-3716-2021
Scopus Author ID: 58168717100

Tatiana V. Tereschenko, Junior Researcher of the Biotechnology Laboratory
Federal State Budgetary Institution "Federal Scientific Center of Agroecology, Complex Melioration and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences"
97, Universitetskiy Prospekt, Volgograd, 400062, Russian Federation
tereschenko@vfanc.ru
SPIN-code: 5590-9182
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9116-6062
ResearcherID: AAO-4937-2021

Поступила 05.11.2024 Received 05.11.2024
После рецензирования 14.12.2024 Revised 14.12.2024
Принята 20.12.2024 Accepted 20.12.2024

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-4-1321 **EDN: EFBJTI**
УДК 57.084.1:579.64

CC BY NC ND

Научная статья

ВЛИЯНИЕ МИКРООРГАНИЗМОВ РОДА *BACILLUS* НА МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ И ФОТОСИНТЕТИЧЕСКИЙ АППАРАТ *ALLIUM CEPA*

А.А Касторнов, С.А. Петров, А.М. Субботин

Аннотация

Обоснование. Криосфера является хранилищем древних экосистем, в частности дисперсных грунтов, перешедших в мерзлое состояние. Известно, что данные грунты содержат определенное количество как абиотических, так и биотических компонентов, в том числе бактериальных клеток, находящиеся в гипометаболическом состоянии с содержанием в одном грамме грунта порядка 10^4-10^6 КОЕ. Многолетнемёрзлые породы (вечная мерзлота) широко распространены в северном полушарии, их возраст достигает от сотен тысяч до миллионов лет, поэтому содержащиеся в них бактериальные компоненты в полной мере можно отнести к палеобактериям. Ассоциации современной флоры с арктическими палеобактериями вызывает интерес не только с точки зрения изучения фундаментальных основ взаимодействия различных организмов, но и как перспективный биотехнологический ресурс в адаптивном растениеводстве.

Цель исследований. Оценить влияния арктических палеобактерии рода *Bacillus* на морфофизиологические показатели корней и перьев лука *Allium cepa*, а также на его фотосинтетическую активность при различных температурах культивирования.

Материалы и методы. Объектом исследования был выбран лук *Allium cepa*, так как данное растение чувствительно к различным факторам окружающей среды и является эталоном для изучения токсичности. Использовали бактерии рода *Bacillus* (штамм 875 TS), зарегистрированный во Всероссийской коллекции промышленных микроорганизмов под регистрационным номером В-12242.

Оценивали морфофизиологические показатели: количество корней и перьев, их длину и массу, количество темных и изогнутых корней и перьев, кон-

центрацию пигментов фотосинтеза в зеленой части проростков *Allium cepa* методом абсорбционной спектрофотометрии.

Результаты. Проведенные исследования показали, что бактерии рода *Bacillus* штамм 875 TS из многолетнемерзлых пород в концентрации 10^4 при температуре их инкубации 36°C оказывают наибольшее положительное влияние на содержание пигментов фотосинтеза, на корнеобеспечение и развитие вегетативной части лука *Allium cepa*.

Заключение. Бактерии рода Bacillus оказывают воздействие на развитие растения, в частности на формирование корневого и вегетативного аппарата, обогащают растения полезными веществами и являются перспективным биологическим ресурсом для разработки биопрепаратов в повышении урожайности сельскохозяйственных культур.

Ключевые слова: бактерии рода *Bacillus*; дисперсные обводненные мерзлые породы; *Allium cepa*; морфометрия; корневая и вегетативная система; пигменты фотосинтеза

Для цитирования. Касторнов, А. А., Петров, С. А., & Субботин, А. М. (2025). Влияние микроорганизмов рода *Bacillus* на морфологические параметры и фотосинтетический аппарат *Allium cepa*. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(4), 45-63. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-4-1321

Original article

THE INFLUENCE OF BACTERIA OF THE GENUS *BACILLUS* ON THE MORPHOLOGICAL PARAMETERS AND PHOTOSYNTHETIC APPARATUS OF *ALLIUM CEPA*

A.A. Kastornov, S.A. Petrov, A.M. Subbotin

Abstract

Background. The cryosphere is a repository of ancient ecosystems, in particular dispersed soils that have become frozen. It is known that these soils contain a certain amount of both abiotic and biotic components, including bacterial cells in a hypometabolic state with a content of about 10^4-10^6 CFU per gram of soil. Permafrost is widespread in the northern hemisphere, and its age ranges from hundreds of thousands to millions of years, so the bacterial components they contain can be fully attributed to paleobacteria. Modern flora associations with arctic paleobacteria are

of interest not only from the point of researching view the fundamental principles of interaction between various organisms, but also as a promising biotechnological resource in adaptive plant growing.

Purpose. To assess the influence of arctic paleobacteria of the genus *Bacillus* on the morphophysiological parameters of the roots and feathers of the onion *Allium cepa*, as well as its photosynthetic activity at different cultivation temperatures.

Materials and methods. The object of the study was the onion *Allium cepa*, since this plant is sensitive to various environmental factors and is a standard for studying toxicity. We used bacteria of the genus *Bacillus* (strain 875 TS), registered in the Russian National Collection of Industrial Microorganisms under registration number B-12242.

The following morphophysiological parameters were assessed: the number of roots and feathers, their length and weight, the number of dark and curved roots and feathers, the concentration of photosynthesis pigments in the green part of *Allium cepa* seedlings using absorption spectrophotometry.

Results. The conducted research have shown that bacteria of the genus Bacillus strain 875 TS from permafrost rocks in a concentration of 10^4 at an incubation temperature of 36 ° C have the greatest positive effect on the content of photosynthetic pigments, root provision and development of the vegetative part of the onion *Allium cepa*.

Conclusion. Bacteria of the genus *Bacillus* influence plant development, in particular, the formation of the root and vegetative apparatus, enrich plants with useful substances and are a promising biological resource for the development of biopreparations to increase the yield of agricultural crops.

Keywords: bacteria of the genus *Bacillus*; dispersed waterlogged frozen rocks; *Allium cepa*; morphometry; root and vegetative system; photosynthesis pigments

For citation. Kastornov, A. A., Petrov, S. A., & Subbotin, A. M. (2025). The influence of bacteria of the genus *Bacillus* on the morphological parameters and photosynthetic apparatus of *Allium cepa*. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(4), 45-63. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-4-1321

Введение

Современное состояние криосферы определяется наличием льда в атмосфере, гидросфере, на поверхности земли и в подземных слоях, а также микробиоты, обитающей в дисперсных обводненных породах, находящихся в мёрзлом состоянии [11; 17]. Обводненные мерзлотные породы широко распространены в Северном полушарии и имеют возраст, достигающий сотен тысяч и миллионов лет [12]. Они содержат микроорганизмы, возраст

которых сопоставим с возрастом мерзлых почв [15]. Исследования показывают, что с начала индустриальной эпохи средняя температура воздуха на Земле увеличилась более чем на 1 градус. При этом процесс глобального потепления в Арктике происходит значительно быстрее, что приводит к деградации дисперсных обводненных пород, находящихся в мерзлом состоянии, и как следствие - к выносу реликтовой микробиоты в современные экосистемы. Однако информации о её влиянии на современную флору и фауну недостаточно.

Многообразие форм микроорганизмов в биоценозах определяют их взаимоотношения в виде фундаментальной стратегии к самосохранению. Некоторые виды симбиотически тесно связаны друг с другом и их выживание в значительной мере зависит от их союзников (мутуализм, комменсализм). Другие микроорганизмы, наоборот, вступают в жесткую конкуренцию (антагонизм) и борются за ограниченные ресурсы, такие как питательные вещества, свет и территория [16].

Арктические экосистемы, в которых обитают микроорганизмы, играют важную роль для северных территорий. По причине того, что эти экосистемы наиболее чувствительны и подвержены воздействию изменений климата, в том числе деградации вечной мерзлоты, биологический потенциал микробиоты в данных условиях стал определяющим. Новые технологии существенно расширили знания о составе, функциональном состоянии и поведении микроорганизмов дисперсных обводненных пород в холодных средах [2; 11].

Исследование биологических свойств *Bacillus sp*. из дисперсных обводненных мерзлых породах показало наличие у бактерий иммуномодулирующего и геронтологического эффекта: увеличение продолжительности жизни и улучшение физического состояния лабораторных животных [8; 16]. Имеются также литературные данные о влияние палеобактерий рода *Bacillus sp*. на морфофизиологические показатели зерновых и зернобобовых культуры [1; 13; 23]. Тем не менее, остается недостаточно экспериментальных данных для обоснования использования биологического потенциала уникальных свойств арктических палеобактерий в разработке технологий для решения актуальных практических задач сельского хозяйства. В частности, исследование микробиоты арктических палеоэкосистем представляется перспективной и современной областью научных знаний в развитии адаптивного растениеводства [22].

Цель исследований – оценка влияния палеобактерии рода *Bacillus* на морфофизиологические показатели *Allium cepa,* при различных температурах культивирования.

Материалы и методы исследований

Объектом исследования был выбран лук *Allium cepa* (сорт Центурион F1), который является общепризнанной и популярной тест-системой in vivo для оценки биологических эффектов влияния различных химических, физических и биологических факторов и рекомендован экспертами ВОЗ в качестве стандарта при мониторинге окружающей среды и изучения влияния факторов окружающей среды на современные экосистемы [7; 10; 20].

Дизайн исследования приведен в табл. 1. Выборка луковиц для эксперимента была однородной. Масса луковицы составила в среднем 3,21 г, а диаметр их – от 1,6 до 2 см.

Таблица 1.

Дизайн исследования

Контроль		Бактерий/мл									Сум.
		10^5			10^4			10^3			
		t° культивирования									
1	2	5°C	23°C	36°C	5°C	23°C	36°C	5°C	23°C	36°C	
Количество луковиц, шт											
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	33
											

Использовали бактерии рода *Bacillus* (штамм 875 TS), зарегистрированный во Всероссийской коллекции промышленных микроорганизмов под регистрационным номером В-12242. Бактерии культивировали 48 часов на скошенном питательном ГРМ при температуре 26°C после чего их дополнительно инкубировали 72 часа при температурах 5°C, 23°C и 36°C для модификации их метаболической активности.

Затем бактерии отмывали с поверхности агара 5 мл стерильной дистиллированной воды. В эксперименте использовались концентрации 10^3, 10^4, и 10^5 микробных клеток в 1 мл дистиллированной воды. Луковицы находились в соответствующих суспензиях бактериальных клеток в фитотроне при средней температуре 25°C и влажности воздуха 27% в течение 5 суток. Корни и перья лука, выращенных на дистиллированной воде, служили контролем №1, а на смыве с чистого ГРМ агара – контролем №2. Для оценки морфометрических показателей использовали следующие параметры: количество корней и перьев, их длину и массу, а также количество темных и изогнутых корней и перьев.

Проводился анализ корнеобеспеченности по формуле [5]:

$$К = мП/мК, \quad (1),$$

где:

мП – масса перьев

мК – масса корней

Оценка концентрации пигментов фотосинтеза в зеленой части проростков *Allium cepa* проводилась методом абсорбционной спектрофотометрии. В качестве полярного растворителя использовали 96% этанол, навеску 100 мг. Зеленую часть каждого растения измельчали в фарфоровой ступке с добавлением небольшого количества безводного сульфата натрия (Na_2SO_4) до образования однородного окрашенного порошка. С помощью металлического шпателя порошок из ступки помещали в пробирку, добавляли 8 мл 96% этанола. Пробирку встряхивали и давали осадку отстояться. Надосадочную жидкость удаляли механическим дозатором, осторожно, не касаясь осадка и помещали в кюветы спектрофотометра с толщиной поглощающего слоя 10 мм. Оптическую плотность экстракта определяли с помощью спектрофотометра ПЭ-5400УФ и регистрировали при длине волны 665, 649 и 440 нм. В качестве контроля использовали чистый растворитель (96% спирт).

Концентрацию хлорофилла a и b в объеме кюветы спектрофотометра рассчитывали по формулам [24]:

$$Хл.a = 13,70*A665 - 5,76*A649 \quad (2);$$

$$Хл.b = 25,80*A649 - 7,60*A665 \quad (3);$$

$$Хл.a+b = 6,10*A665 - 20,04*A649 \quad (4);$$

где A – оптическая плотность при данной длине волны

Концентрацию β-каротина рассчитывали по формуле [3]:

$$Смг\% = (Dx*W*1000)/(E^{1\%}_{1\,см}*A) \quad (5),$$

где:

Dx – оптическая плотность исследуемого раствора;

W – объем кюветы, равный 8 мл

$E^{1\%}_{1\,см}$ – удельный показатель поглощения β-каротина, равный 2500

A – навеска экстракта, взятая на анализ, г.

Исследуемые данные были обработаны с использованием интегрированного статистического программного комплекса «SPSS Statistics 23 для операционной системы Windows 10». Различия принимались статистически значимыми при уровне значимости t-критерий Стьюдента $p<0,05$.

Результаты исследования и их обсуждение

При анализе роста и развития лука на смыве с чистой питательной среды (контроль 2) на 5 сутки выявлено подавление только развития кор-

невой системы *Allium cepa* по сравнению с контролем 1, что проявилось в задержке образования количества корней в 1,35 раза и появлении темных деформированных корешков (табл. 2).

Тем не менее, это не повлияло на интегрированный показатель корнеобеспеченности. Поэтому в последующем при изучении влияния бактерий рода *Bacillus cereus* штамма 875 TS на развитие корневой системы лука *Allium cepa* полученные данные сравнивали с контролем 2.

Таблица 2.

Влияние штамма 875 TS на корневую систему лука в различных концентрациях и температурах инкубации на 5 день

№ п/п	Параметры	t°C	Контроль 1	Контроль 2	Концентрация			
					10^5	10^4	10^3	Тренд
1.	Кол-во корней, шт	5°C	30,66±1,65	23,00±1,26 **	24,67±1,80 *	26,33±0,92*/#	15,67±5,34*	y = -4,5x + 31,22 R^2 = 0,61
		23°C	30,66±1,65	23,00±1,26 **	26,67±0,92 */#	25,00±0,73**	29,67±2,56	y = 1,5x + 24,11 R^2 = 0,40
		36°C	30,66±1,65	23,00±1,26 **	24,67±1,28 *	20,33±0,76***	21,67±1,17***	y = -1,5x + 25,22 R^2 = 0,46
2.	Длина корней, см	5°C	2,34±0,24	2,77±0,31	2,49±0,04	2,49±0,06	1,29±0,42 */#	y = -0,60x + 3,30 R^2 = 0,75
		23°C	2,34±0,24	2,77±0,31	2,64±0,11	2,32±0,12	2,41±0,03	y = -0,12x + 2,69 R^2 = 0,49
		36°C	2,34±0,24	2,77±0,31	2,58±0,13	2,03±0,13 #	2,58±0,16	y = 0,00x + 2,39 R^2 = 3E-05
3.	Масса корней, г	5°C	0,34±0,05	0,23±0,02	0,24±0,03	0,23±0,02	0,20±0,07	y = -0,02x + 0,27 R^2 = 0,88
		23°C	0,34±0,05	0,23±0,02	0,23±0,01	0,33±0,02 ##	0,29±0,05	y = 0,03x + 0,22 R^2 = 0,38
		36°C	0,34±0,05	0,23±0,02	0,30±0,03	0,17±0,01 **/#	0,27±0,02	y = -0,01x + 0,27 R^2 = 0,03
4.	Кол-во тёмных корней, шт	5°C	0,00±0,00	1,33±0,2 ***	1,00±0,36*	0,00±0,00 ##	0,00±0,00 ##	y = -0,5x + 1,33 R^2 = 0,75
		23°C	0,00±0,00	1,33±0,2 ***	0,00±0,00 ###	0,00±0,00 ###	0,00±0,00 ###	
		36°C	0,00±0,00	1,33±0,2 ***	0,00±0,00 ##	0,00±0,00 ##	0,00±0,00 ##	

5.	Кол-во изогнутых корней, шт	5°C	1,33±0,56	2,33±0,21	1,00±0,00 ##	2,67±0,42	2,33±0,76	y = 0,67x + 0,67 R^2 = 0,57
		23°C	1,33±0,56	2,33±0,21	3,33±0,21 **/##	2,67±0,56	3,00±0,73	y = -0,17x + 3,33 R^2 = 0,25
		36°C	1,33±0,56	2,33±0,21	0,67±0,21 ##	1,67±0,42	0,00±0,00 */##	y = -0,33x + 1,44 R^2 = 0,16

Примечание: * - статистическая значимость различий с контролем 1 (* - $p < 0,05$; ** - $p < 0,01$; *** - $p < 0,001$); # - статистическая значимость различий с контролем 2 (# - $p < 0,05$; ## - $p < 0,01$).

На первом этапе исследования было проанализировано влияние концентрации бактерий на развитие корневой и вегетативной части лука. Установлено, что при инкубации бактерий при температуре +5˚С с увеличением концентрации бактериальных клеток имеется тенденция к росту количества корешков ($y = -4,5x + 31,22$ при $R^2 = 0,61$), их длины ($y = -0,60x + 3,30$ при $R^2 = 0,75$), массы ($y = -0,02x + 0,27$ при $R^2 = 0,88$) и появление патологических корешков ($y = -0,5x + 1,33$ при $R^2 = 0,75$) с высоким коэффициентом аппроксимации. В таблице 2 показано, что с увеличением концентрации бактерий с 10^3 до 10^5 наблюдается явная задержка развития корневой системы лука. Особенно выраженный эффект был получен при концентрации *Bacillus cereus* в 10^4 – количество корней увеличивалось до 26,33±0,92 по сравнению с контролем 2 (23,00±1,26 при $p < 0,05$).

В тоже время, на развитие вегетативной части оказывало влияние концентрация бактерий при инкубации их при температуре +23˚С (табл. 3).

При данной температуре с уменьшением концентрации бактерий с 10^5 до 10^3 наблюдается статистически значимая задержка как количества перьев ($y = -0,83x + 2,67$ при $R^2 = 0,89$), так и их длины ($y = -0,47x + 1,63$ при $R^2 = 0,61$). Инкубация бактерий при температуре +36˚С с увеличением концентрации микробных клеток с 10^3 до 10^5 наблюдается возрастание количества ($y = 0,17x + 0,89$ при $R^2 = 0,75$) и длины перьев ($y = 0,09x + 0,64$ при $R^2 = 0,75$). Активация роста зелёной части растений соответствующим образом влияет на увеличение в 13,5 раз значения интегрального коэффициента корнеобеспеченности, который характеризует соотношения баланса между корневой и вегетативной системой растения.

Проведенные исследования показали, что наибольшее положительное влияние на корнеобеспеченость и развитие вегетативной части лука *Allium cepa* оказывают бактерии рода *Bacillus* штамм 875 TS из многолетнемерзлых пород в концентрации 10^4 при температуре их инкубации 36°С.

Таблица 3.

Влияние штамма 875 TS на вегетативную систему лука и корнеобеспеченность в различных концентрациях и температурах инкубации на 5 день

№ п/п	Параметры	t°C	Контроль 1	Контроль 2	Концентрация			
					10^5	10^4	10^3	Тренд
1.	Кол-во перьев, шт	5°C	1,00±0,36	0,67±0,42	0,67±0,42	0,33±0,21	0,67±0,42	
		23°C	1,00±0,36	0,67±0,42	1,67±0,21 #	1,33±0,56	0,00±0,00 *	y = -0,83x + 2,67 R^2 = 0,89
		36°C	1,00±0,36	0,67±0,42	1,00±0,36	1,33±0,42	1,33±0,42	y = 0,17x + 0,89 R^2 = 0,75
2.	Длина перьев, см	5°C	1,10±0,40	0,77±0,48	0,58±0,37	0,30±0,19	0,73±0,46	y = 0,08x + 0,39 R^2 = 0,12
		23°C	1,10±0,40	0,77±0,48	0,94±0,08	1,12±0,46	0,00±0,00 *	y = -0,47x + 1,63 R^2 = 0,61
		36°C	1,10±0,40	0,77±0,48	0,77±0,25	0,77±0,31	0,95±0,31	y = 0,09x + 0,64 R^2 = 0,75
3.	Масса перьев, г	5°C	0,07±0,02	0,04±0,03	0,02±0,02	0,01±0,00 *	0,04±0,02	y = 0,01x + 0,02 R^2 = 0,10
		23°C	0,07±0,02	0,04±0,03	0,05±0,01	0,11±0,05	0,00±0,00 **	y = -0,03x + 0,11 R^2 = 0,25
		36°C	0,07±0,02	0,04±0,03	0,04±0,02	0,39±0,17 #	0,04±0,02	y = 0,00x + 0,15 R^2 = 0,00
4.	Корнеобсть, у.е.	5°C	0,17±0,05	0,16±0,10	0,14±0,09	0,03±0,02 *	0,18±0,12	y = 0,02x + 0,08 R^2 = 0,07
		23°C	0,17±0,05	0,16±0,10	0,24±0,04	0,35±0,16	0,00±0,00 **	y = -0,12x + 0,44 R^2 = 0,45
		36°C	0,17 ±0,05	0,16±0,10	0,12±0,06	2,17±0,91 *#	0,15±0,05	y = 0,01x + 0,78 R^2 = 0,00

Примечание: * - достоверность различий с контролем 1 (* - $p < 0,05$; ** - $p < 0,01$; *** - $p < 0,001$); # - достоверность различий с контролем 2 (# - $p < 0,05$; ## - $p < 0,01$).

Установлено, что при инкубации бактерий при температуре +36˚С с увеличением концентрации бактериальных клеток имеется тенденция к росту показателя chl b ($y = 0,84x + 5,13$ при $R^2 = 0,90$), суммы chl a и b ($y = 1,06x + 7,53$ при $R^2 = 0,86$), β-каротина ($y = 1,03x + 11,09$ при $R^2 = 0,83$) с высоким коэффициентом аппроксимации (табл. 4).

Также показано, что с увеличением концентрации с 10^3 до 10^5 наблюдается увеличение показателей фотосинтетической активности зеленой части лука. Особенно выраженный эффект был получен при концентрации *Bacillus cereus* в 10^4 – показатель chl b увеличился в 7,5 раз и составил 4,44±1,72 по сравнению с контролем 2 (0,59±0,37 при $p < 0,05$). Показатель суммы хлорофиллов a и b увеличился в 4,73 раза и составил 6,72±2,53 по сравнению с контролем 2 (1,42±0,90 при $p < 0,05$).

Таблица 4.

Влияние штамма 875 TS на фотосинтетическую активность лука в различных концентрациях и температурах инкубации на 5 день

№ п/п	Параметры	t°C	Контроль 1	Контроль 2	Концентрация			
					10^5	10^4	10^3	Тренд
	Chl a, мг/г	5°C	1,89±0,60	0,83±0,53	1,12±0,71	0,73±0,46	1,21±0,77	y = 0,05x + 0,92 R² = 0,04
		23°C	1,89±0,60	0,83±0,53	2,28±0,08 #	2,11±0,75	0,00±0,00 **	y = -1,14x + 3,74 R² = 0,81
		36°C	1,89±0,60	0,83±0,53	2,27±0,81	1,77±0,56	1,83±0,58	y = -0,22x + 2,40 R² = 0,65
2.	Chl b, мг/г	5°C	0,85±0,35	0,59±0,37	1,93±1,22	1,36±0,86	1,56±0,98	y = -0,19x + 1,99 R² = 0,42
		23°C	0,85±0,35	0,59±0,37	3,78±0,41 ***/###	2,79±0,89 */#	0,00±0,00 *	y = -1,89x + 5,98 R² = 0,93
		36°C	0,85±0,35	0,59±0,37	4,44±1,72 */#	3,12±1,06 */#	2,76±0,90 #	y = -0,84x + 5,13 R² = 0,90
3.	a+b, мг/г	5°C	2,74±0,89	1,42±0,90	3,05±1,93	2,09±1,32	2,77±1,75	y = -0,14x + 2,92 R² = 0,08
		23°C	2,74±0,89	1,42±0,90	6,06±0,47 **/###	4,90±1,61	0,00±0,00 **	y = -3,03x + 9,72 R² = 0,89
		36°C	2,74±0,89	1,42±0,90	6,72±2,53 #	4,90±1,59 #	4,59±1,46	y = -1,06x + 7,53 R² = 0,86
4.	β-каротин, мг/г	5°C	8,20±2,59	4,32±2,73	5,78±3,66	3,27±2,07	6,05±3,82	y = 0,13x + 4,77 R² = 0,01
		23°C	8,20±2,59	4,32±2,73	10,45±0,62 #	9,49±3,49	0,00±0,00 **	y = -5,23x + 17,10 R² = 0,82
		36°C	8,20±2,59	4,32±2,73	10,34±3,68	8,49±2,69	8,28±2,64	y = -1,03x + 11,09 R² = 0,83
5.	a/b, у.е.	5°C	2,02±0,87	0,47±0,30	0,19±0,12 *	0,18±0,11 *	0,26±0,16 *	y = 0,03x + 0,14 R² = 0,60
		23°C	2,02±0,87	0,47±0,30	0,63±0,05	0,49±0,17	0,00±0,00 *	y = -0,31x + 1,00 R² = 0,90
		36°C	2,02±0,87	0,47±0,30	0,36±0,12	0,40±0,14	0,46±0,15	y = 0,05x + 0,31 R² = 0,99

Примечание: * - достоверность различий с контролем 1 (* - $p < 0,05$; ** - $p < 0,01$; *** - $p < 0,001$); # - достоверность различий с контролем 2 (# - $p < 0,05$; ## - $p < 0,01$).

Таким образом, показано, что бактерии рода *Bacillus* штамм 875 TS из многолетнемерзлых пород оказывают существенное влияние на фотосинтетическую активность и тем самым регулирует трансформирование энергии солнечного света в энергию химических связей органических соединений через такие ключевые пигменты фотосинтеза как chl a, chl b и β-каротин.

Заключение

Все чаще становится очевидным, что для поддержания устойчивого производства сельскохозяйственных культур в изменяющихся условиях окружающей среды разработка и внедрение возможностей инженерии корневой системы растений предоставляет перспективной. Специфические для корней черты, такие как архитектура корневой системы, восприятие эдафического стресса и коммуникация между корнями и побегами, могут быть использованы для улучшения захвата полезных веществ, воды из почвы и повышения адаптационных потенциала растения. Эти реакции часто используют микроорганизмы и их метаболиты, которые можно применять с помощью обычных (например, прививка) или биотехнологических генетических подходов (например, промоторы, специфичные для корней) для непосредственного улучшения этих черт и, следовательно, производительности растений.

Последние данные свидетельствуют о том, что биопрепараты влияют на синтез корнями цитокининов и могут повышать устойчивость растений к абиотическим факторам внешней среды, вызванное экологическим стрессом [19], а также опосредовать устойчивость к болезням и вредителям [14; 21]. Манипулирование биотическими взаимодействиями в ризосфере на уровне коммуникации (гормоны и другие биоактивные соединения) можно использовать в адаптивном растениеводстве.

Известно, что бактерии рода *Bacillus* участвуют во время роста растения, принимая участие в формировании корневого и вегетативного аппарата, насыщают растения полезными веществами и являются перспективными ресурсами в качестве биоудобрения и повышения урожайности зерновых и зернобобовых культур [23].

Проведенные нами исследования показали, что наибольшее положительное влияние на корнеобеспечение лука *Allium cepa* оказывают бактерии рода *Bacillus* штамм 875 TS из многолетнемерзлых пород в концентрации 10^4 при температуре их инкубации 36°C. Достигнутый оптимальный баланс корнеобеспечения под воздействием *Bacillus* штамм 875 TS проявляется в активном развитии и вегетативной системы растения, что выражается в показателях урожайности *Allium cepa:* масса перьев увеличивается в 9,75 раз. Следовательно, палеобактерии рода *Bacillus* штамм 875 TS являются перспективным биотехнологическим ресурсом в развитии адаптивного растениеводства. При этом показано, что влияние палеобактерий рода *Bacillus* штамма 875 TS из арктических палеоэкосистем на морфофизиологические характеристики *Allium cepa* значительно зависит от таких факторов как: концентрация микроорганизмов и температура их инкубации.

Один из механизмов оптимальной регуляции корневой системы на развития биологическую продуктивность растений является фотосинтетическая система, ключевыми пигментами которой являются хлорофилл a и хлорофилл b [4; 6]. Через хлорофилл a происходит преобразование энергии света в энергию разделения зарядов в процессе оксигенного фотосинтеза, а через хлорофилл b – сбор света при слабом освещении и рассеиванию избытка поглощенной энергии при сильном освещении [8]. Через другой компонент фотосинтеза – β-каротин происходит защита фотосинтетического аппарата от фотоокисления на слишком ярком свету. Механизм защитного действия его заключается в том, что энергия возбуждении триплетного хлорофилла и синглетного кислорода резонансным путем передается на каротиноиды, а затем рассеивается в виде тепла.

Установлено, что бактерий палеобактерий рода *Bacillus* штамма 875 TS через корневую систему растения вызывают рост chl b, суммы chl a и b, β-каротина. Особенно выраженный эффект был получен при концентрации *Bacillus cereus* в 10^4 – показатель chl b увеличился в 7,5 раз, сумма хлорофиллов a и b - в 4,73 раза.

Таким образом, возможно создание биопрепарата для повышения урожайности лука, который будет представлять собой культуральную жидкость, содержащие природные штаммы микроорганизмов из многолетних мерзлых пород, улучшенные естественным и искусственным отбором. Действующими веществами будет являться комплекс биологически активных веществ - продукты метаболизма бактериальных клеток. Данные продукты участвуют в стимуляции растений в ризосфере. В дальнейшем подобные исследования должны быть сосредоточены на получении информации о физиологических и генетических детерминантах такой производительности и о механизмах оптимальной регуляции in radix.

Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей и животных в качестве объектов исследований.

Информация о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация о спонсорстве. Работа выполнена в рамках государственного задания на 2021-2030 годы «Пространственно-временные явления и процессы, происходящие в водах земли Сибири в условиях современного техногенеза и изменения климата» (Приоритетное направление 1.5.11. Программа 1.5.11.1).

Список литературы

1. Бажин, А. С., Субботин, А. М., Петров, С. А., Нарушко, М. В., & Каленова, Л. Ф. (2021). Влияние буровых шламов разной степени очистки на морфофизиологические показатели злаковых растений. В *Сборник материалов международной конференции «Современные исследования трансформации криосферы и вопросы геотехнической безопасности сооружений в Арктике»* (с. 43–46). Салехард. https://doi.org/10.7868/9785604610848009. EDN: https://elibrary.ru/YTRKWN
2. Петров, С. А., Еноктаева, О. В., Субботин, А. М., & Мальчевский, В. А. (2015). Комплексная балловая система оценки воздействия микроорганизмов на пролиферацию клеток корневой меристемы *Allium cepa* L. *Фундаментальные исследования*, *7-4*, 687–690. EDN: https://elibrary.ru/UGAQNJ
3. Ландина, Л. Н. (2021). Стандартизация сухого экстракта сока мякоти тыквы, обладающего гиполипидемическим действием по содержанию β-каротина. *Медицина*, *1*, 79–92. https://doi.org/10.29234/2308-9113-2021-9-1-79-92. EDN: https://elibrary.ru/JIHQOO
4. Лаханов, А. П., Коломейченко, В. В., & Фесенко, Н. В. (2004). *Морфофизиология и продукционный процесс гречихи* (435 с.). Орёл: Орловский государственный аграрный университет. EDN: https://elibrary.ru/PBXPZZ
5. Коробко, В. В., Пчелинцева, Н. В., Лунёва, М. А., & Самсонова, Е. А. (2017). Особенности роста и развития проростков пшеницы (*Triticum aestivum* L.) при действии 2,4,6-трифенил-3,5-дихлорпиридина и 2,6-дифенил-3-хлорпиридина. *Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология*, *17*(1), 72–78. https://doi.org/10.18500/1816-9775-2017-17-1-72-78. EDN: https://elibrary.ru/YKKJAB
6. Иванов, Л. А., Ронжина, Д. А., Юдина, П. К., Золотарева, Н. В., & Калашникова, И. В. (2020). Сезонная динамика содержания хлорофиллов и каротиноидов в листьях степных и лесных растений на уровне вида и сообщества. *Russian Journal of Plant Physiology*, *67*(3), 278–288. https://doi.org/10.31857/S0015330320030112. EDN: https://elibrary.ru/XMYDPZ
7. Курбанова, М. Н., Сураева, Н. М., Рачкова, В. П., & Самойлов, А. В. (2018). Сравнительное изучение показателей токсической активности в Аллиум-тесте. *Аграрный вестник Урала*, *4*(171), 25–30. EDN: https://elibrary.ru/XUCOKD
8. Тютерева, Е. В., Иванова, А. Н., & Войцеховская, О. В. (2014). К вопросу о роли хлорофилла b в онтогенетических адаптациях растений. *Ботанический институт им. В. Л. Комарова РАН*, *134*(3), 249–256. EDN: https://elibrary.ru/SGZRUX

9. Субботин, А. М., Петров, С. А., Мальчевский, В. А., & Хрупа, Д. А. (2018). Цитогенетический анализ влияния бактерий *Serratia fonticola*, выделенных из проб многолетнемерзлых пород, на клетки корневой системы *Allium cepa* L. В *Тезисы докладов XI Международной конференции «Биология клеток растений in vitro и биотехнология»* (с. 220–221). Минск. EDN: https://elibrary.ru/YRDMFV
10. Basu, S., & Tripura, K. (2021). Differential sensitivity of *Allium cepa* L. and *Vicia faba* L. to aqueous extracts of *Cascabela thevetia* (L.) Lippold. *South African Journal of Botany*, *139*, 67–78. https://doi.org/10.1016/j.sajb.2021.01.033. EDN: https://elibrary.ru/UKTTBB
11. Collins, T., & Margesin, R. (2019). Microbial ecology of the cryosphere (glacial and permafrost habitats): current knowledge. *Applied Microbiology and Biotechnology*, *103*, 2537–2549. https://doi.org/10.1007/s00253-019-09631-3. EDN: https://elibrary.ru/UOMKYI
12. Liang, R., Li, Z., Lau Vetter, M. C. Y., et al. (2021). Genomic reconstruction of fossil and living microorganisms in ancient Siberian permafrost. *Microbiome*, *9*, 110. https://doi.org/10.1186/s40168-021-01057-2. EDN: https://elibrary.ru/DCXMWZ
13. Renev, N. O., Rodina, E. S., Subbotin, A. M., & Malchevskiy, V. A. (2021). Influence of bacterial metabolites from permafrost on morphophysiological parameters of potato material in vitro. In *International Scientific and Practical Conference "Fundamental Scientific Research and Their Applied Aspects in Biotechnology and Agriculture" (FSRAABA 2021)* [BIO Web of Conferences, vol. 36, article 05009]. Tyumen. https://doi.org/10.1051/bioconf/20213605009. EDN: https://elibrary.ru/XSQJDD
14. Smigocki, A. C., Heu, S., Mccanna, I., Wozniak, C., & Buta, G. (1997). Insecticidal compounds induced by regulated overproduction of cytokinins in transgenic plants. In N. Carozzi & M. Koziel (Eds.), *Advances in insect control: the role of transgenic plants* (pp. 225–236). Bristol.
15. Jansson, J. K., & Taş, N. (2014). The microbial ecology of permafrost. *Nature Reviews Microbiology*, *12*, 414–425. https://doi.org/10.1038/nrmicro3262. EDN: https://elibrary.ru/SOEPQH
16. Bauer, M. A., Kainz, K., Carmona-Gutierrez, D., & Madeo, F. (2018). Microbial wars: competition in ecological niches and within the microbiome. *Microbial Cell*, *5*(5), 215–219.
17. Panikov, N. S. (2009). Microbial activity in frozen soils. In R. Margesin (Ed.), *Permafrost Soils* (pp. 119–147). Innsbruck.
18. Brouchkov, A. V., Trofimova, Y. B., Melnikov, V. P., Sukhovei, Y. G., Griva, G. I., Kalenova, L. F., Subbotin, A. M., Repin, V. E., Brenner, E. V., Tanaka, M., Katayama, T., & Utsumi, M. (2011). Relict microorganisms of cryolithozone as

possible objects of gerontology. *Advances in Gerontology*, 39–44. https://doi.org/10.1134/S207905701101005X. EDN: https://elibrary.ru/RHEVRD

19. Ghanem, M. E., Albacete, A., Smigocki, A. C., Frebort, I., Pospíšilová, H., Martínez-Andújar, C., Acosta, M., Sanchez-Bravo, J., Lutts, S., Dodd, I. C., & Pérez-Alfocea, F. (2011). Root-synthesised cytokinins improve shoot growth and fruit yield in salinised tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *Journal of Experimental Botany*, *62*, 125–140. https://doi.org/10.1093/jxb/erq266. EDN: https://elibrary.ru/OARSPZ
20. Smigocki, A. C., Heu, S., & Buta, S. G. (2000). Analysis of insecticidal activity in transgenic plants carrying the IPT plant growth hormone gene. *Acta Physiologiae Plantarum*, *22*, 295–299. https://doi.org/10.1007/s11738-000-0038-x. EDN: https://elibrary.ru/VAHFDA
21. Souza, C. P., Guedes, T. A., & Fontanetti, C. S. (2016). Evaluation of herbicides action on plant bioindicators by genetic biomarkers: a review. *Environmental Monitoring and Assessment*, *188*.
22. Kastornov, A. A., Subbotin, A. M., & Petrov, S. A. (2022). The influence of microorganisms of the Arctic paleoecosystems on the morphometric parameters and the cytogenetic apparatus of *Allium cepa*. In *Dedicated to the 101st anniversary of the discovery of the law of homological series and the 134th anniversary of the birth of N. I. Vavilov* [BIO Web of Conferences, vol. 43, article 03013]. Saratov. https://doi.org/10.1051/bioconf//20224303013. EDN: https://elibrary.ru/UCFFKT
23. Timofeev, V. N., & Subbotin, A. M. (2024). Preparations based on bacteria from frozen rocks during the dressing of spring wheat seeds. *BIO Web of Conferences*, *108*, article 10006. https://doi.org/10.1051/bioconf/202410810006. EDN: https://elibrary.ru/SMQVPA
24. Wintermans, J. F., & de Mots, A. (1965). Spectrophotometric characteristics of chlorophylls *a* and *b* and their phenophytins in ethanol. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) — Biophysics including Photosynthesis*, *109*, 448–453. https://doi.org/10.1016/0926-6585(65)90170-6

References

1. Bazin, A. S., Subbotin, A. M., Petrov, S. A., Narushko, M. V., & Kalenova, L. F. (2021). Effect of drilling cuttings with different purification degrees on morphophysiological parameters of cereal plants. In *Proceedings of the international conference "Modern studies of cryosphere transformation and issues of geotechnical safety of structures in the Arctic"* (pp. 43–46). Salekhard. https://doi.org/10.7868/9785604610848009. EDN: https://elibrary.ru/YTRKWN
2. Petrov, S. A., Enoktaeva, O. V., Subbotin, A. M., & Malchevsky, V. A. (2015). Comprehensive scoring system for assessing the impact of microorganisms on

cell proliferation of Allium cepa L. root meristem. *Fundamental Research*, *7-4*, 687–690. EDN: https://elibrary.ru/UGAQNJ

3. Landina, L. N. (2021). Standardization of dry extract of pumpkin pulp juice with hypolipidemic effect by β-carotene content. *Medicine*, *1*, 79–92. https://doi.org/10.29234/2308-9113-2021-9-1-79-92. EDN: https://elibrary.ru/JIHQOO
4. Lakhanov, A. P., Kolomeichenko, V. V., & Fesenko, N. V. (2004). *Morphophysiology and production process of buckwheat* (435 pp.). Oryol: Oryol State Agrarian University. EDN: https://elibrary.ru/PBXPZZ
5. Korobko, V. V., Pchelintseva, N. V., Luneva, M. A., & Samsonova, E. A. (2017). Features of growth and development of wheat seedlings (Triticum aestivum L.) under the influence of 2,4,6-triphenyl-3,5-dichloropyridine and 2,6-diphenyl-3-chloropyridine. *Proceedings of Saratov University. New Series. Series: Chemistry. Biology. Ecology*, *17*(1), 72–78. https://doi.org/10.18500/1816-9775-2017-17-1-72-78. EDN: https://elibrary.ru/YKKJAB
6. Ivanov, L. A., Ronzhina, D. A., Yudina, P. K., Zolotareva, N. V., & Kalashnikova, I. V. (2020). Seasonal dynamics of chlorophyll and carotenoid content in leaves of steppe and forest plants at species and community levels. *Russian Journal of Plant Physiology*, *67*(3), 278–288. https://doi.org/10.31857/S0015330320030112. EDN: https://elibrary.ru/XMYDPZ
7. Kurbanova, M. N., Suraeva, N. M., Rachkova, V. P., & Samoilov, A. V. (2018). Comparative study of toxic activity indicators in the Allium test. *Agrarian Bulletin of the Urals*, *4*(171), 25–30. EDN: https://elibrary.ru/XUCOKD
8. Tytereva, E. V., Ivanova, A. N., & Voitsukhovskaya, O. V. (2014). On the role of chlorophyll b in ontogenetic adaptations of plants. *Komarov Botanical Institute of the RAS*, *134*(3), 249–256. EDN: https://elibrary.ru/SGZRUX
9. Subbotin, A. M., Petrov, S. A., Malchevsky, V. A., & Khrupa, D. A. (2018). Cytogenetic analysis of the impact of Serratia fonticola bacteria isolated from permafrost samples on Allium cepa L. root system cells. In *Abstracts of the XI International Conference "Plant Cell Biology in vitro and Biotechnology"* (pp. 220–221). Minsk. EDN: https://elibrary.ru/YRDMFV
10. Basu, S., & Tripura, K. (2021). Differential sensitivity of *Allium cepa* L. and *Vicia faba* L. to aqueous extracts of *Cascabela thevetia* (L.) Lippold. *South African Journal of Botany*, *139*, 67–78. https://doi.org/10.1016/j.sajb.2021.01.033. EDN: https://elibrary.ru/UKTTBB
11. Collins, T., & Margesin, R. (2019). Microbial ecology of the cryosphere (glacial and permafrost habitats): current knowledge. *Applied Microbiology and Biotechnology*, *103*, 2537–2549. https://doi.org/10.1007/s00253-019-09631-3. EDN: https://elibrary.ru/UOMKYI

12. Liang, R., Li, Z., Lau Vetter, M. C. Y., et al. (2021). Genomic reconstruction of fossil and living microorganisms in ancient Siberian permafrost. *Microbiome*, *9*, 110. https://doi.org/10.1186/s40168-021-01057-2. EDN: https://elibrary.ru/DCXMWZ
13. Renev, N. O., Rodina, E. S., Subbotin, A. M., & Malchevskiy, V. A. (2021). Influence of bacterial metabolites from permafrost on morphophysiological parameters of potato material in vitro. In *International Scientific and Practical Conference "Fundamental Scientific Research and Their Applied Aspects in Biotechnology and Agriculture" (FSRAABA 2021)* [BIO Web of Conferences, vol. 36, article 05009]. Tyumen. https://doi.org/10.1051/bioconf/20213605009. EDN: https://elibrary.ru/XSQJDD
14. Smigocki, A. C., Heu, S., Mccanna, I., Wozniak, C., & Buta, G. (1997). Insecticidal compounds induced by regulated overproduction of cytokinins in transgenic plants. In N. Carozzi & M. Koziel (Eds.), *Advances in insect control: the role of transgenic plants* (pp. 225–236). Bristol.
15. Jansson, J. K., & Taş, N. (2014). The microbial ecology of permafrost. *Nature Reviews Microbiology*, *12*, 414–425. https://doi.org/10.1038/nrmicro3262. EDN: https://elibrary.ru/SOEPQH
16. Bauer, M. A., Kainz, K., Carmona-Gutierrez, D., & Madeo, F. (2018). Microbial wars: competition in ecological niches and within the microbiome. *Microbial Cell*, *5*(5), 215–219.
17. Panikov, N. S. (2009). Microbial activity in frozen soils. In R. Margesin (Ed.), *Permafrost Soils* (pp. 119–147). Innsbruck.
18. Brouchkov, A. V., Trofimova, Y. B., Melnikov, V. P., Sukhovei, Y. G., Griva, G. I., Kalenova, L. F., Subbotin, A. M., Repin, V. E., Brenner, E. V., Tanaka, M., Katayama, T., & Utsumi, M. (2011). Relict microorganisms of cryolithozone as possible objects of gerontology. *Advances in Gerontology*, 39–44. https://doi.org/10.1134/S207905701101005X. EDN: https://elibrary.ru/RHEVRD
19. Ghanem, M. E., Albacete, A., Smigocki, A. C., Frebort, I., Pospíšilová, H., Martínez-Andújar, C., Acosta, M., Sanchez-Bravo, J., Lutts, S., Dodd, I. C., & Pérez-Alfocea, F. (2011). Root-synthesised cytokinins improve shoot growth and fruit yield in salinised tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *Journal of Experimental Botany*, *62*, 125–140. https://doi.org/10.1093/jxb/erq266. EDN: https://elibrary.ru/OARSPZ
20. Smigocki, A. C., Heu, S., & Buta, S. G. (2000). Analysis of insecticidal activity in transgenic plants carrying the IPT plant growth hormone gene. *Acta Physiologiae Plantarum*, *22*, 295–299. https://doi.org/10.1007/s11738-000-0038-x. EDN: https://elibrary.ru/VAHFDA
21. Souza, C. P., Guedes, T. A., & Fontanetti, C. S. (2016). Evaluation of herbicides action on plant bioindicators by genetic biomarkers: a review. *Environmental Monitoring and Assessment*, *188*.

22. Kastornov, A. A., Subbotin, A. M., & Petrov, S. A. (2022). The influence of microorganisms of the Arctic paleoecosystems on the morphometric parameters and the cytogenetic apparatus of *Allium cepa*. In *Dedicated to the 101st anniversary of the discovery of the law of homological series and the 134th anniversary of the birth of N. I. Vavilov* [BIO Web of Conferences, vol. 43, article 03013]. Saratov. https://doi.org/10.1051/bioconf//20224303013. EDN: https://elibrary.ru/UCFFKT
23. Timofeev, V. N., & Subbotin, A. M. (2024). Preparations based on bacteria from frozen rocks during the dressing of spring wheat seeds. *BIO Web of Conferences*, *108*, article 10006. https://doi.org/10.1051/bioconf/202410810006. EDN: https://elibrary.ru/SMQVPA
24. Wintermans, J. F., & de Mots, A. (1965). Spectrophotometric characteristics of chlorophylls *a* and *b* and their phenophytins in ethanol. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) – Biophysics including Photosynthesis*, *109*, 448–453. https://doi.org/10.1016/0926-6585(65)90170-6

ВКЛАД АВТОРОВ

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку статьи для публикации.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

The authors contributed equally to this article.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Касторнов Александр Александрович, младший научный сотрудник Отдела биоресурсов криосферы
ФГБНУ Федеральный исследовательский центр Тюменский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук
ул. Малыгина, 86, г. Тюмень, 625026, Российская Федерация
AlexKastornov@yandex.ru

Петров Сергей Анатольевич, доктор медицинских наук, профессор, главный научный сотрудник Отдела биоресурсов криосферы
ФГБНУ Федеральный исследовательский центр Тюменский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук
ул. Малыгина, 86, г. Тюмень, 625026, Российская Федерация
tumiki@yandex.ru

Субботин Андрей Михайлович, кандидат биологических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Отдела биоресурсов криосферы

ФГБНУ Федеральный исследовательский центр Тюменский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук
ул. Малыгина, 86, г. Тюмень, 625026, Российская Федерация
subbotin.prion@yandex.ru

DATA ABOUT THE AUTHORS

Aleksandr A. Kastornov, Junior Research Scientist of Department of Bioresources Cryosphere
Federal Research Centre Tyumen Scientific Centre of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
86, Malygina Str., Tyumen, 625026, Russian Federation
AlexKastornov@yandex.ru
SPIN-code: 7133-1500
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0116-5291

Sergei A. Petrov, Doctor of Medicine, Professor, Principal Researcher of Department of Bioresources Cryosphere
Federal Research Centre Tyumen Scientific Centre of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
86, Malygina Str., Tyumen, 625026, Russian Federation
tumiki@yandex.ru
SPIN-code: 8382-8583
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1566-2299

Andrey M. Subbotin, Cand. Sc. Biology, Assistant Professor, leading research scientist of Department of Bioresources Cryosphere
Federal Research Centre Tyumen Scientific Centre of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
86, Malygina Str., Tyumen, 625026, Russian Federation
subbotin.prion@yandex.ru
SPIN-code: 9865-7586
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5135-3194

Поступила 10.04.2025 Received 10.04.2025
После рецензирования 07.05.2025 Revised 07.05.2025
Принята 15.05.2025 Accepted 15.05.2025

ЭКОЛОГИЯ, ПОЧВОВЕДЕНИЕ И ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ

ECOLOGY, SOIL SCIENCE AND NATURE MANAGEMENT

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-4-1180 **EDN: EULRXB**
УДК 631.8

Научная статья

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БИОЧАРА ДЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССА КОМПОСТИРОВАНИЯ КУРИНОГО ПОМЕТА

Н.В. Данилова, Л.Р. Бикташева, П.А. Курынцева, П.Ю. Галицкая, С.Ю. Селивановская

Аннотация

Обоснование. Всестороннее изучение факторов, влияющих на оптимизацию процесса компостирования, является крайне важным. Результаты этого исследования будут способствовать более эффективному и устойчивому управлению отходами куриного помета. Оптимизируя процесс компостирования с помощью добавки в виде биочара, можно снизить экологические и санитарные риски, связанные с непереработанным навозом. Полученный компост будет представлять собой ценное органическое удобрение. В целом, это исследование может способствовать развитию методов управления органическими отходами животноводства.

Цель. Оценка влияния разных доз биочара на основе куриного помета на физико-химические (температура, влажность, содержание биогенных элементов C, N, P, K) и микробиологические (респираторная активность, метаболическая активность микроорганизмов) параметры компостирования куриного помета, а также на фитотоксичность готового компоста в отношении тест-объекта растений овса *Avena sativa* L.

Материалы и методы. В качестве объекта исследования использовался подстилочный куриный помет с содержанием опилок менее 25%. Для приго-

товления компостных смесей в исходный куриный помет вносили биочар в дозе 0, 1, 5, 10, 15% (w:w), а также опилки в количестве 33% (w:w). Компостирование осуществляли в течение 150 суток при температуре 20°C. Содержание общего углерода и общего азота оценивали с использованием элементного анализатора по методу Дюма-Прегля. Размер и характер пор биочара определяли методом сканирующей электронной микроскопии. Удельную площадь поверхности биочара оценивали в соответствии с методикой определения удельной площади из изотерм в модели Брунауэра – Эммета – Теллера (БЭТ) и методом лазерной дифракции согласно ГОСТ Р 8.777-2011. Влажность определяли воздушно-тепловым методом в соответствии с ГОСТ 28268-89. Оценку респираторной активности проводили согласно ISO 14240-1. Общую метаболическую активность микробных сообществ компостных смесей определяли с помощью показателя AWCD (средняя окрашенность ячеек) и коммерческих плашек Biolog Ecoplates (Biolog Inc., США). Фитотоксичность компостных смесей оценивали с помощью индекса прорастания (GI) растений овса (*Avena sativa*) в соответствии с ISO 11269.1:2012.

Результаты. Показано, что внесение биочара не оказало значимого влияния на температурный режим компостирования – все исследуемые компостные смеси характеризовались традиционной динамикой температуры. Для поддержания рекомендованного уровня влажности наиболее оптимальными дозами являлись дозы биочара 10 и 15%. Обнаружено положительное влияние на содержание биогенных элементов C, N, P и K в конечных компостных смесях при использовании 10 и 15% биочара. Отмечено отсутствие влияния биочара на микробиологические параметры компостирования (респираторная активность, метаболическая активность) при сохранении положительной динамики процесса компостировании. Оценка влияния биочара на фитотоксичность компостов показала, что при использовании наибольшей дозы биочара (15%) было обнаружено максимальное значение индекса прорастания GI (118%) для растений овса (*Avena sativa* L.).

Заключение. Таким образом, это исследование подчеркивает потенциал использования биочара, полученного из куриного помета, для улучшения процесса компостирования и повышения качества конечного продукта. Полученные результаты показывают, что включение биочара в процесс компостирования куриного помета не только способствует лучшему сохранению питательных веществ, но и способствует более здоровому росту растений, тем самым предлагая устойчивое решение для управления отходами птицеводства.

Ключевые слова: биочар; куриный помет; компостирование; респираторная активность; микробное сообщество; фитотоксичность

Для цитирования. Данилова, Н. В., Бикташева, Л. Р., Курынцева, П. А., Галицкая, П. Ю., & Селивановская, С. Ю. (2025). Использование биочара для интенсификации процесса компостирования куриного помета. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(4), 64-93. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-4-1180

Original article

USE OF BIOCHAR TO INTENSIFY THE COMPOSTING PROCESS OF CHICKEN MANURE

N.V. Danilova, L.R. Biktasheva, P.A. Kuryntseva, P.Yu. Galitskaya, S.Yu. Selivanovskaya

Abstract

Background. A comprehensive study of the factors affecting the optimization of the composting process is essential. The results of this study will contribute to a more efficient and sustainable management of chicken manure waste. By optimizing the composting process with a biochar additive, the environmental and sanitary risks associated with unprocessed manure can be reduced. The resulting compost will be a valuable organic fertilizer. Overall, this study can contribute to the development of organic animal waste management practices.

Purpose. Evaluation of the effect of different doses of biochar based on chicken manure on physicochemical (temperature, humidity, content of biogenic elements C, N, P, K) and microbiological (respiration activity, metabolic activity of microorganisms) parameters of chicken manure composting, as well as on the phytotoxicity of the finished compost with respect to the test subject of oat plants (*Avena sativa* L.).

Materials and methods. The object of the study was litter chicken manure with a sawdust content of less than 25%. To prepare compost mixtures, biochar was added to the original chicken manure at a dose of 0, 1, 5, 10, 15% (w:w), as well as sawdust in an amount of 33% (w:w). Composting was carried out for 150 days at a temperature of 20 °C. The content of total carbon and total nitrogen was estimated using an elemental analyzer according to the Dumas-Pregl method. The size and nature of biochar pores were determined by scanning electron microscopy. The specific surface area of biochar was estimated in accordance with the method for determining the specific surface area from isotherms in the Brunauer-Emmett-Teller (BET) model and the laser diffraction method according

to GOST R 8.777-2011. Humidity was determined by the air-thermal method in accordance with GOST 28268-89. Respiration activity was assessed according to ISO 14240-1. The total metabolic activity of microbial communities of compost mixtures was determined using the AWCD (average cell color density) index and Biolog Ecoplates (Biolog Inc., USA). The phytotoxicity of the compost mixtures was assessed using the germination index (GI) of oat (*Avena sativa* L.) plants in accordance with ISO 11269.1:2012.

Results. It was shown that biochar application had no significant effect on the composting temperature regime - all compost mixtures studied were characterized by traditional temperature dynamics. To maintain the recommended moisture level, the most optimal doses were biochar doses of 10 and 15%. A positive effect on the content of nutrients C, N, P and K in the final compost mixtures was found when using 10 and 15% biochar. No influence of biochar on microbiological parameters of composting (respiration activity, metabolic activity) was observed, while maintaining positive dynamics of the composting process. Evaluation of biochar influence on phytotoxicity of composts showed that when using the highest dose of biochar (15%) the maximum value of germination index GI (118%) was found for oat plants (*Avena sativa* L.).

Conclusion. Thus, this study highlights the potential of using biochar derived from chicken manure to improve the composting process and enhance the quality of the final product. The results show that the incorporation of biochar into the composting process of chicken manure not only contributes to better nutrient retention, but also promotes healthier plant growth, thus offering a sustainable solution for poultry waste management.

Keywords: biochar; chicken manure; composting; respiration activity; microbial community; phytotoxicity

For citation. Danilova, N. V., Biktasheva, L. R., Kuryntseva, P. A., Galitskaya, P. Yu., & Selivanovskaya, S. Yu. (2025). Use of biochar to intensify the composting process of chicken manure. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(4), 64-93. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-4-1180

Введение

Использование компостов на основе навозов и пометов сельскохозяйственных животных для улучшения плодородия почв является традиционной практикой по всему миру [10]. Компостирование является сложным биохимическим процессом. Для получения эффективного и безопасного конечного продукта необходимо контролировать многие параметры, которые напрямую влияют на оптимальность процесса компо-

стирования. Так, на оптимальность компостирования влияют как тип и характеристики исходного сырья (соотношение C/N, pH, наличие/отсутствие структурирующего агента), так и такие параметры, как температура окружающей среды, температура компостируемой массы, влажность и т.д. [8; 10].

Использование компостов может привести к попаданию в почвы яиц гельминтов, возбудителей инфекционных болезней, остаточных количеств антибиотиков, а также микроорганизмов, обладающих антибиотикорезистентностью. Снизить данные риски возможно при соблюдении строгой технологии и длительности компостирования с достижением температуры компостной смеси не менее 55ºС в термофильную фаза компостирования [17; 31; 37].

В качестве агентов, способствующих компостированию и получению более пригодного конечного продукта, предлагается использовать такие высокопористые субстраты, как биочар. Биочар представляет собой твердый продукт пиролиза отходов биомассы в бескислородных условиях при температуре от 300 до 900 °C [30]. Потенциальными преимуществами использования биочара в качестве добавки при компостировании являются: повышение микробной активности за счет улучшения аэрации, повышение температуры компоста, снижение испарения аммиака, повышение водоудерживающей способности, снижение потерь питательных веществ, сокращение выбросов парниковых газов и запахов и повышение степени гумификации [40].

При использовании биочара для улучшения процесса компостирования необходимо учитывать дозу его внесения. В литературе описаны случаи применения широкого диапазона внесения биочара (3–50%) [23; 24; 27]. В качестве оптимальной наиболее часто предлагается использовать дозу биочара около 10%, однако, известно, что низкие дозы (3–5%) также оказывали заметное положительное влияние на производительность компостирования [18; 28]. Применение биочара в дозе выше 20% не рекомендуется вследствие потенциального негативного воздействия на микробную активность и в результате снижения эффективности процесса компостирования [27].

В литературе, в основном, представлены и хорошо описаны случаи применения в качестве добавки для компостирования биочара, изготовленного на основе древесного и растительного лигноцеллюлозного сырья [33]. Однако, представляется потенциально возможным и экономически выгодным производство биочара на основе органических отходов сель-

ского хозяйства, в частности куриного помета. Куриный помет является крупнотоннажным отходом с непригодными для использования в необработанном виде характеристиками [22]. Так, в работе Галиевой Г.Ш. с соавторами была изучена возможность использования биочара на основе куриного помета в качестве полезной добавки в почву для выращивания различных сельскохозяйственных растений, а также его влияние на почвенное микробное сообщество [1]. Кроме того, исследовано влияние на почву компостов, содержащих биочар, а также приведены оптимальные дозы внесения биочара в почву [25]. Однако, свойства биочара напрямую зависят от физико-химических параметров исходного субстрата и, следовательно, ответная реакция микробного сообщества компостов и почв, обрабатываемых таким биочаром, сложно прогнозируема. Поэтому, необходимым является проведение дополнительных исследований для конкретного субстрата (куриный помет, коровий навоз и т.д.), который планируется использовать для изготовления биочара.

Цель исследования. Целью работы являлась оценка влияния разных доз биочара на основе куриного помета на физико-химические (температура, влажность, содержание биогенных элементов C, N, P, K) и микробиологические (респираторная активность, метаболическая активность микроорганизмов) параметры компостирования куриного помета, а также на фитотоксичность готового компоста в отношении тест-объекта растений овса *Avena sativa* L.

Материалы и методы исследования

В качестве объекта исследования использовался подстилочный куриный помет, полученный с птицефабрики ООО «Челны-Бройлер» (г. Набережные Челны, Татарстан) с содержанием опилок менее 25%. Для приготовления компостных смесей в исходный куриный помет вносили разные дозы биочара (w:w), а также опилки в количестве 33% (w:w). В результате были приготовлены следующие компостные смеси – вариант К0 (контроль, без добавления биочара), вариант В1% (содержание биочара 1%), вариант В5% (содержание биочара 5%), вариант В10% (содержание биочара 10%) и вариант В15% (содержание биочара 15%). Биочар был получен на основе этого же куриного помета с помощью slow-пиролиза при пиковой температуре 400 °C, поддерживаемой в течение 3 часов. Характеристики исходного куриного помета и биочара на его основе представлены в таблице 1. Фотографии поверхности биочара, полученные с помощью сканирующей электронной микроскопии, представлены на рисунке 1.

Таблица 1.

Исходные характеристики куриного помета и биочара на его основе

Характеристика	Куриный помет	Биочар
pH	7,3	7,2
K, мг/кг	9775	25
P, мг/кг	4350	23
C, мг/кг	194	190
N, мг/кг	36	28

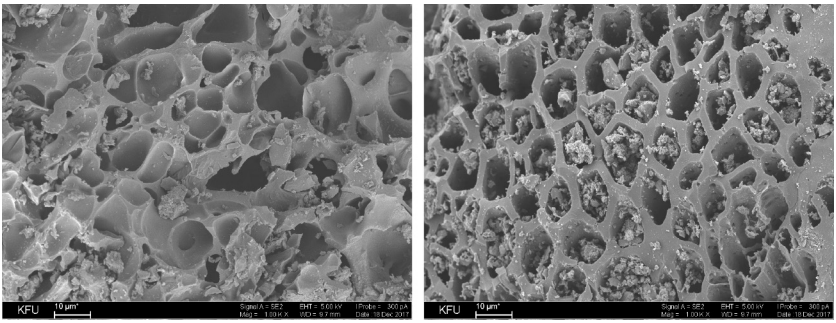


Рис. 1. Фотографии поверхности биочара, полученные с помощью сканирующей электронной микроскопии

Компостирование осуществляли в течение 150 суток при температуре 20°C в компостерах с вращающимся барабаном объемом 200 л. Все варианты компостирования проводились в 3 повторностях. В течение всего процесса компостирования влажность смесей искусственно поддерживалась на уровне 55-60%. В течение первого месяца перемешивание компостов осуществляли три раза в сутки на протяжении 1 часа со скоростью 40 об/мин, далее проводили дозревание в буртах с перемешиванием дважды в неделю.

Температуру и влажность компостов измеряли ежедневно в течение всего процесса компостирования. Для измерения респираторной и метаболической активности микробных сообществ компостных смесей образцы отбирали на 1, 7, 14, 21, 28, 35, 42, 49, 56, 70, 84 и 150 сутки, Содержание биогенных элементов (C, N, K и P) измеряли на 1 и 150 сутки компостирования. Фитотоксичность компостных смесей оценивали на 150 сутки компостирования.

Содержание общего углерода и общего азота оценивали с использованием элементного анализатора по методу Дюма-Прегля, основанного на сжигании образца в кислородной среде при температуре до 1100°C [2].

Содержание калия и фосфора измеряли методом спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой по ПНД Ф 16.1:2.3:3.11-98 [5].

Размер и характер пор биочара определяли методом сканирующей электронной микроскопии на автоэмиссионном высокоразрешающем сканирующем электронном микроскопе Merlin (Carl Zeiss) с помощью программного обеспечения ImageJ (www.imagej.net). Удельную площадь поверхности биочара оценивали в соответствии с методикой определения удельной площади поверхности пироугля из изотерм в модели Брунауэра – Эммета – Теллера (БЭТ) [5] и методом лазерной дифракции согласно ГОСТ Р 8.777-2011 [4].

Влажность определяли воздушно-тепловым методом в соответствии с ГОСТ 28268-89 [3].

Оценку респираторной активности проводили согласно ISO 14240-1 [19]. 0,02 г образца помещали в три марлевых мешочка. В лабораторную колбу наливали 20 мл раствора гидроксида натрия (0,05 М), внутрь помещали мешочек с образцом. Колбу закрывали и инкубировали в течение 24 часов при 25°С. Через 24 часа мешочек осторожно удаляли и добавляли 2 мл раствора хлорида бария (0,05 М) для осаждения адсорбированного CO_2 в виде карбоната бария. Добавляли три-четыре капли раствора индикатора (фенолфталеин) и остаточное содержание гидроксида натрия титровали разбавленной соляной кислотой (0,1 М).

Общую метаболическую активность микробных сообществ компостных смесей определяли с помощью показателя AWCD (средняя окрашенность ячеек) и коммерческих плашек Biolog Ecoplates (Biolog Inc., США). В каждую лунку 96-тилучночной планшеты, содержащей субстрат и индикатор окслительно-восстановительного процесса, раскапывали по 180 мкл исследуемых образцов (1:10). Планшеты инкубировали при 25 °С в течение 120 часов. Результаты оценивали фотометрически на Multiskan FC (Thermo Fisher Scientific) при длине волны 595 нм. Индекс разнообразия Шеннона (H) рассчитывали согласно Beisel at al. [9].

Фитотоксичность компостных смесей оценивали с помощью индекса прорастания (GI) растений овса (*Avena sativa* L.) в соответствии с ISO 11269.1:2012 [20].

Все измерения проводились не менее чем в трехкратной повторности. Статистическую обработку полученных результатов проводили с помощью Microsoft Office Excel 2010 (Редмонд, Вашингтон, США). Все графические данные содержат средние значения и стандартные ошибки. Для оценки значимости различий использовали критерий Фишера при $\alpha = 0,05$.

Результаты исследования и обсуждение

1. Влияние разных доз биочара на физико-химические параметры компостных смесей

Температурный баланс играет решающую роль при компостировании, он является результатом комплекса сложных процессов разложения и синтеза органического вещества, происходящих при компостировании. Поэтому температура компостной смеси в тот или иной момент компостирования является важным показателем его эффективности [10]. Высокая температура компостов в первые дни компостирования, вызванная экзотермическими процессами разложения органического вещества, способствуют удалению из компостов клеток, спор и цист патогенных и паразитических видов: в качестве оптимальной, с данной точки зрения, рекомендуется температура от 55ºС, которая поддерживается в компостной смеси в течение 3 суток [38]. Показано, что использование биочара при компостировании может продлевать продолжительность термофильной фазы и улучшать санитарные характеристики готового продукта, в том числе и при относительной низкой температуре окружающей среды [7].

Результаты измерения температуры компостов с разными дозами биочара представлены на рисунке 2. Обнаружено, что в контрольной компостной смеси без биочара термофильная стадия началась на 2 сутки компостирования, при этом максимальная температура составила 53-56 ºС. Далее наблюдалось постепенное снижение температуры во всех вариантах компостов, которая после 16 суток и до конца процесса компостирования оставалась на уровне температуры окружающей среды.

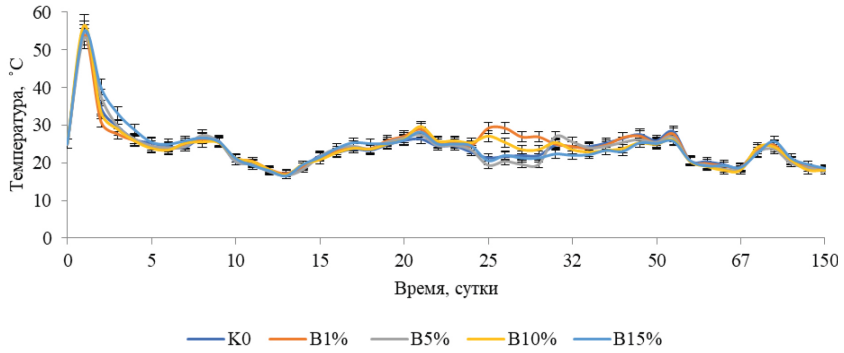


Рис. 2. Температура компостных смесей, содержащих разные дозы биочара

Внесение биочара не привело к изменению температуры смесей относительно контроля. Кроме того, не было выявлено достоверно значимых различий в температурном режиме и продолжительности термофильной фазы между смесями, обработанными разными дозами биочара. Вероятно, в нашем случае отсутствие влияния было вызвано оптимальными для компостирования температурами окружающей среды, а также благоприятном составом использованной для компостирования смеси (куриный помет и входящий в его состав подстилочный материал), которая перемешивалась и увлажнялась должным образом. Действительно, особая эффективность внесения биочара в компосты наблюдалась другими авторами при пониженных температурах окружающей среды, либо в случаях, когда пометы и навозы были полужидкими, без структурирующих элементов, что приводило к недостаточной аэрации компостов [26].

Несмотря на то, что температура, как результирующий параметр процесса компостирования, не подверглась влиянию биочара, нами были проанализированы и другие важные параметры компостирования, в частности, влажность и содержание биогенных элементов.

Для оптимизации разложения органического вещества во время компостирования требуется уровень влажности в диапазоне 40–60%. При более высокой влажности процесс компостирования становится анаэробным, а при более низкой – происходит ингибирование микробного сообщества компоста. Внесение биочара в компосты как агента с высокими адсорбирующими свойствами способствует регулированию изменения влажности в компостной куче, поскольку он увеличивает водоудерживающую способность смеси [33].

Результаты оценки влажности компостных смесей с разным содержанием биочара представлены ни рисунке 3. Видно, что контрольный вариант К0 характеризовался самым высокой влажностью по сравнению с компостами с биочаром. Ее значения составляли в среднем 85%. В вариантах компостов с наименьшим содержанием биочара В1% и В5% также было обнаружено содержание влаги более 60%, в среднем оно составило 63 и 74%. Наиболее оптимальными для поддержания рекомендуемого уровня влажности оказались дозы биочара 10 и 15%. В данных вариантах компоста влажность составляла в среднем 52 и 50%.

Положительное влияние на уровень влажности от внесения биочара в компосты также было отмечено в литературе [32]. Однако, в литературе описан и противоположный эффект, когда добавление более высоких доз биочара (более 20%) вызывало пересушивание компостных смесей и

снижение микробной активности в результате повышенной аэрации из-за высокой пористости субстрата [27].

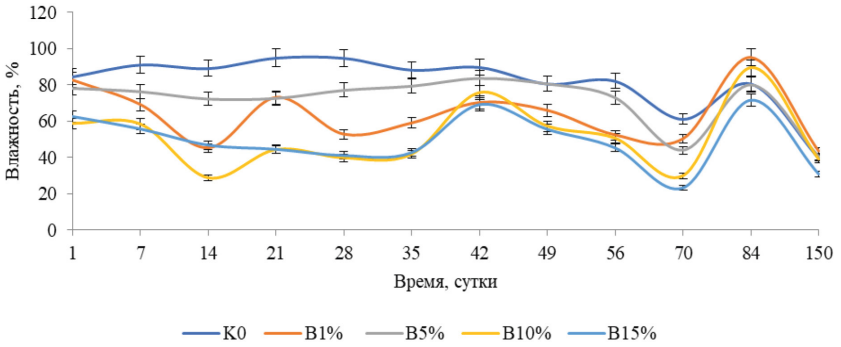


Рис. 3. Влажность компостных смесей, содержащих разные дозы биочара

Биочар на основе растительного сырья обычно характеризуется стойкой структурой, состоящей из углеродных колец, которая практически не разрушается в процессе компостирования. Биочар же, приготовленный из пометов и навозов, не имеет такой упорядоченной структуры, кроме того, он содержит большее количество биогенных элементов, в частности азот. Эти элементы могут попадать в компостные смеси и влиять на процессы разложения и синтеза органических веществ в процессе компостирования [16]. Таким образом, использование биочара при компостировании может влиять на соотношение C/N, которое является одним из ключевых параметров, влияющих на микробиологию компоста [39]. Большая площадь поверхности биочара способствует удерживанию питательных веществ, что позволяет избежать их потерь в результате выщелачивания или улетучивания и увеличить доступность питательных веществ для микроорганизмов. Это особенно важно для удержания азота и органического углерода, который может быть использован микроорганизмами в качестве питания [33].

Результаты оценки содержания биогенных элементов (C, N, P и K) в компостных смесях с разным содержанием биочара представлены на рисунке 4а-г. Содержание C, N, P и K в контрольном компосте К0 на 1 сутки компостирования составило 39,2%, 20,8%, 4729 мг/кг и 11565 мг/кг, соответственно, а на 150 сутки – 37,6%, 26,3%, 4928,5 мг/кг и 21329,5 мг/кг, соответственно. Полученные данные согласуются с данными, представленными в литературе, о содержании биогенных элементов при компостировании куриного помета [42]. Во время термофильной фазы содержание

С в материале активно снижается за счет разложения органического вещества микроорганизмами. В результате потери органического вещества и воды уменьшается вес компостируемой массы и снижается соотношение C/N. По мере сокращения доступных источников углерода, скорость деградации органического вещества постепенно снижается. В результате потери сухой массы компостного материала увеличивается концентрация различных элементов, в том числе N, P и K [10].

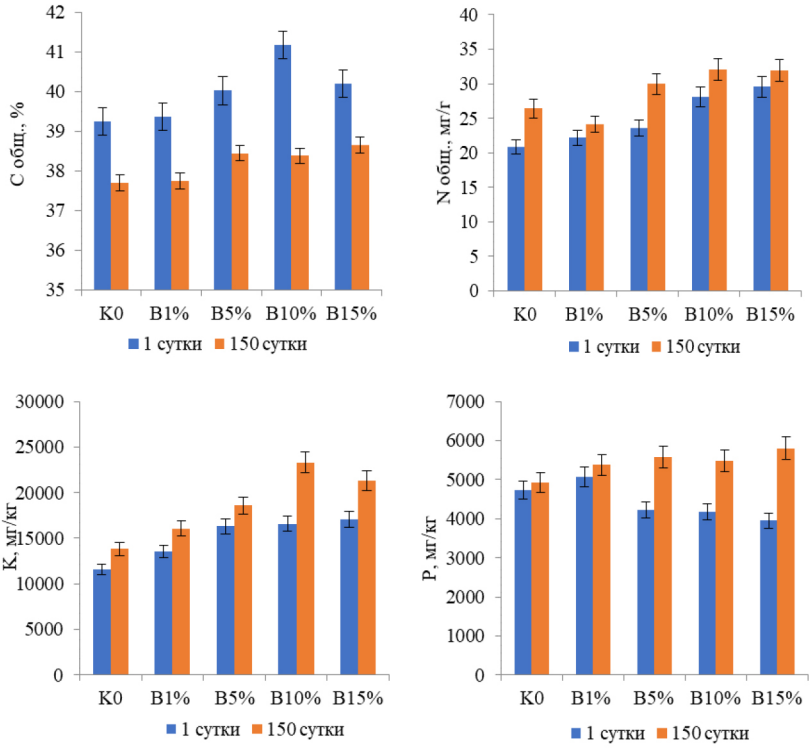


Рис. 4. Содержание общего углерода (а), общего азота (б), калия (в) и фосфора (г) в компостных смесях, содержащих разные дозы биочара

При внесении биочара было обнаружено увеличение содержания С в компостах относительно контроля как на 1 сутки, так и на 150 сутки, причем в компостной смеси с наименьшей дозой биочара (вариант B1%) уровень содержания С остался сопоставимым с таковым в контрольном

образце. Увеличение содержания С в компостах при добавлении биочара связано с тем, что биочар является углеродсодержащим субстратом, что позволяет использовать его в целях компенсации естественных потерь углерода в результате минерализации в течение процесса компостирования [15].

В компостных смесях с биочаром было выявлено увеличение содержания N по сравнению с контролем как на 1 сутки, так и на 150 сутки, причем наибольшие отличия от контроля были обнаружены для образцов компостов, обработанных большей дозой биочара (варианты В10% и В15%). При компостировании обычно наблюдаются значительные потери азота, снизить которые успешно помогает добавление биочара в исходные смеси [12].

Внесение биочара способствовало увеличению содержания К в компостах относительно контроля, причем был обнаружен дозозависимый эффект на 150 сутки компостирования. Поскольку биочар изначально содержал в себе К, то при добавлении различных его доз наблюдался эффект в аккумулировании К в конечных компостах в результате растворения и выщелачивания калиевых солей [41].

На 1 сутки содержание Р в компостах с добавлением более высоких доз биочара (5, 10 и 15%) было значительно ниже, чем в контроле. На 150 сутки наблюдалось увеличение содержания Р в этих вариантах компостных смесей. Вероятно, вначале биочар сорбировал растворимые соединения фосфора, а далее произошло постепенное их высвобождение. Кроме того, фосфорсодержащие соединения могли поступать в компост и из самого биочара [35].

Полученные данные подтверждаются результатами другим авторов о том, что использование биочара во время компостирования навозов и пометов способствует накоплению в конечном продукте углерода, азота, а также других биогенных элементов, таких как фосфор и калий, тем самым повышая удобрительные характеристики таких компостов [35, 41].

2. Влияние разных доз биочара на микробиологические параметры компостных смесей

Потенциальное влияние биочара на процесс компостирования может быть не только прямым (как результат сорбции, десорбции влаги и элементов), но и опосредованным, через основной драйвер процесса компостирования – бактерии и грибы. Сообщается, что поры биочара могут становиться местами повышенного концентрирования микроорганизмов

из-за создания для них благоприятных условий. Кроме того, биочар может изменять pH и влажность компостов, что так же может приводить к повышению микробной активности [11].

Респираторная активность является показателем стабильности компостов, поскольку отражает интенсивность процесса минерализации органического вещества. При его активной деградации происходит перераспределение количества выделяемого углекислого газа: при эффективном процессе в начале оно больше, чем при неэффективном, а в конце – наоборот, ниже [14].

Результаты оценки респираторной активности микробного сообщества компостов с разными дозами биочара представлены на рисунке 5. В контрольном варианте максимальная респираторная активность была обнаружена на 1 сутки процесса компостирования и составила 215,9 мг CO_2 – С/г*ч. Далее она постепенно снижалась, однако было зафиксировано еще два пика респираторной активности на 14 и 42 сутки – 165,3 и 192,6 мг CO_2 – С/г*ч, соответственно. Начиная с 49 суток, ее значения снизились и до конца процесса компостирования составляли 50,2–85,5 мг CO_2 – С/г*ч. Полученные результаты согласуются с литературными данными и отражают традиционный характер динамики уровня респираторной активности при компостировании куриного помета [34].

Наибольшее значение респираторной активности для всех образцов компостов с биочаром зафиксировано на 1 сутки компостирования, оно находилось в пределах 160 (образец В10%) – 280 мг CO_2 – С/г*ч (образец В5%). Далее уровень респираторной активности в целом снижался во всех компостных смесях с биочаром, однако характеризовался значительными флуктуациями. Так, на 21 и 28 сутки были отмечены пики респираторной активности для образцов В1% (174,1 и 166 мг CO_2 – С/г*ч) и В10% (138,3 и 149,8 мг CO_2 – С/г*ч). После 49 суток респираторная активность компостов с биочаром находилась на уровне 28-66 мг CO_2 – С/г*ч и существенно не изменялась, как и в контрольном образце, что свидетельствует о достижении стабильности исследуемыми компостными смесями.

Отмеченные пики респираторной активности компостов с биочаром связаны с тем, что внесение биочара изменяет условия функционирования микробного сообщества компостов (аэрация, влажность, высокая пористость, доступность питательных веществ), что влияет на интенсивность деградации органического вещества и выделение углекислого газа [14].

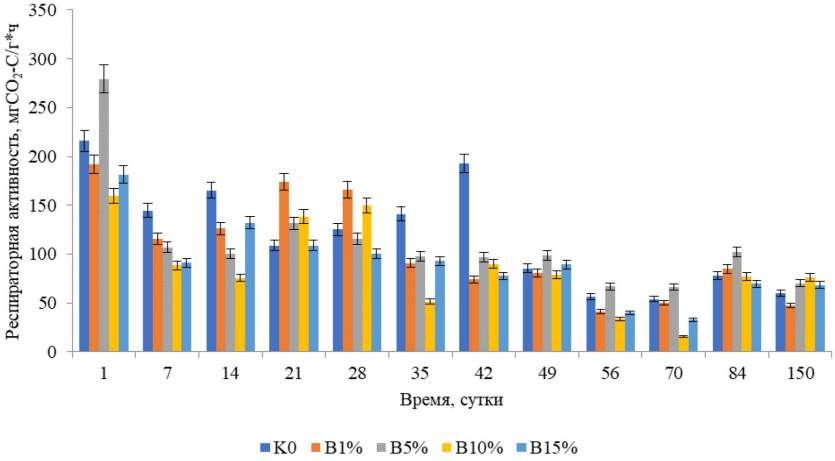


Рис. 5. Респираторная активность микробного сообщества компостных смесей, содержащих разные дозы биочара

Кроме респираторной активности, нами была оценена общая метаболическая активность микроорганизмов компостных смесей с использованием метода Biolog Ecolpate (позволяющего проанализировать способность микроорганизмов разлагать различные углеродные субстраты). Установлено, что метаболическая активность контрольного образца К0 была высокой на 1 сутки процесса компостирования, затем наблюдалось ее снижение. Начиная с 42 суток, метаболическая активность увеличилась и оставалась на таком уровне до 150 суток. В образцах компостов, содержащих биочар, метаболическая активность была также высокой на 1 сутки и в целом на последующие сутки характер ее изменения был схожим с таковым в контрольном компосте.

Результаты оценки биоразнообразия микробного сообщества исследуемых компостов с помощью индекса Шеннона представлены на рисунке 7. В целом, динамика изменения биоразнообразия как в контроле, так и в образцах с биочаром сопоставима с изменением уровня метаболической активности в процессе компостирования. На 1 сутки отмечено высокое биоразнообразие для всех вариантов компостных смесей, далее наблюдалось его снижение и затем, начиная с 42 суток, биоразнообразие вновь увеличилось.

Во время термофильной фазы происходит разложение легкодоступных растворимых соединений углерода, кроме того, происходит самора-

зогрев компостных смесей. Все это приводит к значительному снижению разнообразия микроорганизмов в эту фазу. Именно таким снижением разнообразия, и соответственно, узким диапазоном субстратов, которые немногочисленные виды микроорганизмов способны разлагать, и обусловлены низкие показатели AWCD и индекса Шеннона в данной фазе компостирования. Далее, вероятно, в микробном сообществе появились виды, способные к деградации сложных органических соединений, что привело к расширению спектра потребляемых субстратов и увеличению показателя AWCD.

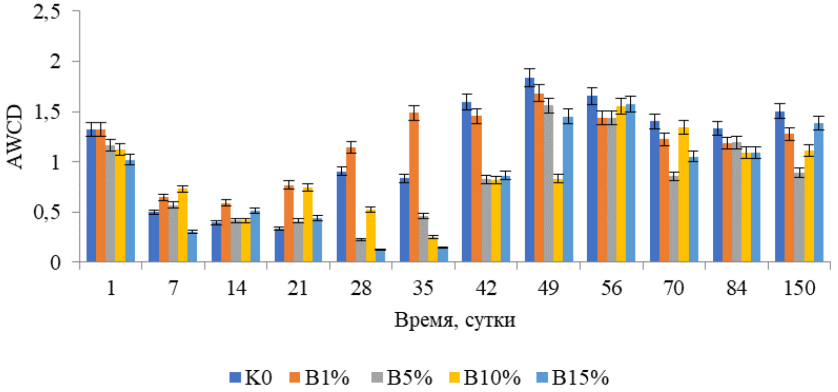


Рис. 6. Степень потребления субстратов микробным сообществом компостных смесей, содержащих разные дозы биочара

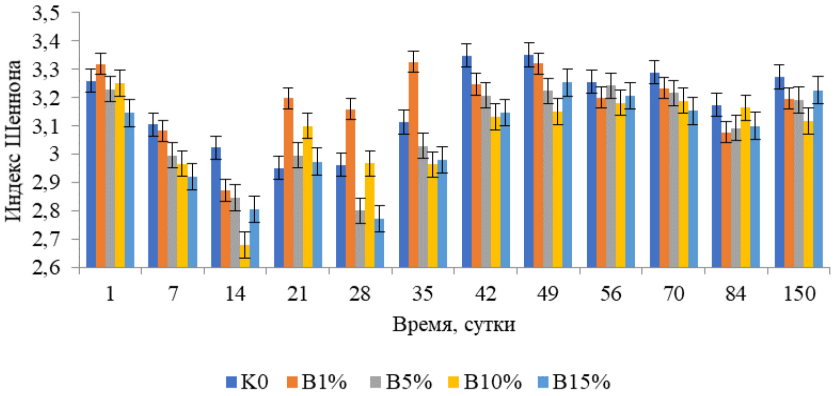


Рис. 7. Индекс биоразнообразия микробного сообщества компостных смесей, содержащих разные дозы биочара

Биочар оказывает положительное влияние на микробное сообщество компостов, стимулирует размножение микроорганизмов и метаболическую активность [6]. Было выявлено увеличение активности ключевых ферментов (уреазы, фосфатазы и полифенолоксидазы) на 30–40% в компосте, смешанном с биочаром [21]. Было также обнаружено обогащение разнообразия бактериального сообщества в компостах, смешанных с биочаром, что отражалось в увеличении индекса Шеннона на всех этапах компостирования [36].

В нашем случае, внесение разных доз биочара не оказало значимого влияния на метаболическую активность и биоразнообразие микробного сообщества, вероятно, по той причине, что компостные смеси изначально содержали все необходимые для микроорганизмов питательные вещества, а также в процессе компостирования строго регулировались параметры компостирования, такие как влажность, аэрация и т.д.

3. Влияние разных доз биочара на фитотоксичность компостных смесей

Фитотоксичность является важным показателем, характеризующим достижение компостом стадии зрелости. Совместное компостирование навоза с биочаром способствует увеличению всхожести семян и урожайности растений, так как он, обладая высокой емкостью катионного обмена, снижает выщелачивание питательных веществ. Кроме того, биочар снижает биодоступность тяжелых металлов и фитотоксичных соединений, в значительном количестве содержащихся в навозах и пометах [29].

Фитотоксичность компостных смесей оценивалась нб 150 сутки с помощью индекса прорастания GI на растениях овса (*Avena sativa* L.) (рисунок 8). Уровень GI менее 50% указывает на сильную фитотоксичность компоста, 50–80% — на умеренную фитотоксичность и более 80 % — на отсутствие фитотоксичности [29]. Согласно полученным результатам, все исследуемые компостные смеси обладали индексом прорастания более 80%, что указывает на отсутствие фитотоксичности. В контрольном компосте индекс прорастания составил 90%. В вариантах с добавлением 1, 5 и 10% биочара индекс прорастания был сопоставимым с контролем – 88, 87 и 89 %, соответственно. Наиболее оптимальной с точки зрения снижения фитотоксичности оказалась доза биочара 15%. В данном образце было выявлено максимальное значение индекса прорастания, которое составило 118%. Вероятно, использование биочара в большей дозе, с одной стороны, позволило наиболее эффективно сорбировать токсичные для растения соединения в компосте, а с другой стороны, способствовало снабжению растений необходимыми питательными элементами.

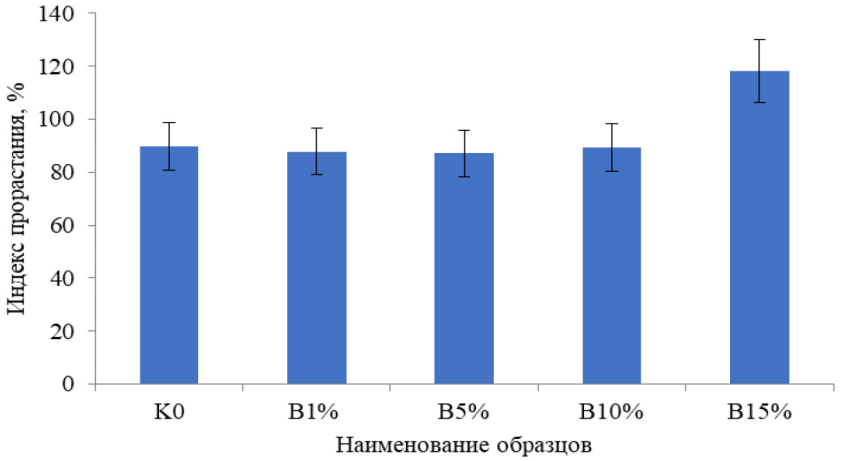


Рис. 8. Индекс прорастания тест-объекта растений овса (*Avena sativa* L.) в компостных смесях, содержащих разные дозы биочара

В литературе также указывается на снижение фитотоксичных свойств компостов, предварительно обработанных биочаром. Так, было выявлено максимальное значение GI 120% для компоста, смешанного с биочаром в дозе 10%, GI 110% – для компоста с 5% биочара и GI 90% – для компоста с 3% биочара [13]. В другом исследовании самое высокое значение GI было обнаружено при использовании биочара в дозе 10% [29].

Заключение

В данной работе было исследовано влияние разных доз биочара на основе куриного помета (0, 1, 5, 10, 15%) на эффективность процесса компостирования куриного помета. Показано, что внесение биочара не оказало значимого влияния на температурный режим компостирования – все исследуемые компостные смеси характеризовались традиционной динамикой температуры. Для поддержания рекомендованного уровня влажности наиболее оптимальными дозами являлись дозы биочара 10 и 15%. Обнаружено положительное влияние на содержание биогенных элементов C, N, P и K в конечных компостных смесях при использовании 10 и 15% биочара. Отмечено отсутствие влияния биочара на микробиологические параметры компостирования (респираторная активность, метаболическая активность) при сохранении положительной динамики процесса компостировании. Оценка влияния биочара на фитотоксичность компостов по-

казала, что при использовании наибольшей дозы биочара (15%) было обнаружено максимальное значение индекса прорастания GI (118%) для растений овса (*Avena sativa* L.).

Заключение комитета по этике. Неприменимо.

Информированное согласие. Не применимо.

Информация о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация о спонсорстве. Работа выполнена за счет средств субсидии, выделенной в рамках государственной поддержки Казанского (Приволжского) федерального университета в целях повышения его конкурентоспособности среди ведущих мировых научно-образовательных центров.

Список литературы

1. Галиева, Г. Ш., Курынцева, П. А., & Галицкая, П. Ю. (2021). Влияние биочара из куриного помёта на микроорганизмы и растения. *Учёные записки Казанского университета. Серия: Естественные науки*, *163*(2), 221–237. https://doi.org/10.26907/2542-064X.2021.2.221-237. EDN: https://elibrary.ru/MDQGQM
2. Гельман, Е. А., Терентьева, Т. М., & Шанина, Н. Э. (1987). *Методы количественного органического элементного микроанализа* (292 с.). Москва: Химия.
3. ГОСТ 28268-89. *Почвы. Методы определения влажности, максимальной гигроскопической влажности и влажности устойчивого завядания растений* (с. 1–8). Москва: Стандартинформ, 2006.
4. ГОСТ Р 8.777-2011. *Государственная система обеспечения единства измерений. Дисперсный состав аэрозолей и взвесей. Определение размеров частиц по дифракции лазерного излучения* (с. 1–11). Москва: Стандартинформ, 2019.
5. *Количественный химический анализ почв. Методика выполнения измерений содержания металлов в твёрдых объектах методом спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой* (ПНД Ф 16.1:2.3:3.11-98, с. 1–31). Москва, 2005.
6. Amoakwah, E., Frimpong, K., & Arthur, E. A. (2022). Biochar amendment impacts on microbial community structures and biological and enzyme activities in a weathered tropical sandy loam. *Applied Soil Ecology*, *172*(12), 104364. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.104364. EDN: https://elibrary.ru/PHGMGW

7. Antonangelo, J. A., Sun, X., & Zhang, H. (2021). The roles of co-composted biochar (COMBI) in improving soil quality, crop productivity, and toxic metal amelioration. *Journal of Environmental Management*, *277*, 1–13. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111443. EDN: https://elibrary.ru/LRXGZL
8. Arikan, O., Mulbry, W., Ingram, D., & Millner, P. (2009). Minimally managed composting of beef manure at the pilot scale: Effect of manure pile construction on pile temperature profiles and on the fate of oxytetracycline and chlortetracycline. *Bioresource Technology*, *100*(19), 4447–4453. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.12.063
9. Beisel, J. N., & Moreteau, J. C. (1997). A simple formula for calculating the lower limit of Shannon's diversity index. *Ecological Modelling*, *99*(2), 289–292. https://doi.org/10.1016/S0304-3800(97)01954-6. EDN: https://elibrary.ru/AIRYOV
10. Bernal, M. P., Alburquerque, J. A., & Moral, R. (2009). Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. A review. *Bioresource Technology*, *100*(22), 5444–5453. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.11.027
11. Bolan, S., Hou, D., & Wang, L. (2023). The potential of biochar as a microbial carrier for agricultural and environmental applications. *Science of the Total Environment*, *886*(2), 163968. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163968. EDN: https://elibrary.ru/SLCEUD
12. Chen, Y. X., Huang, X. D., & Han, Z. Y. (2010). Effects of bamboo charcoal and bamboo vinegar on nitrogen conservation and heavy metals immobility during pig manure composting. *Chemosphere*, *78*(9), 1177–1181. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2009.12.029
13. Chung, W. J., Chang, S. W., & Chaudhary, D. K. (2021). Effect of biochar amendment on compost quality, gaseous emissions and pathogen reduction during in-vessel composting of chicken manure. *Chemosphere*, *283*, 131129. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131129. EDN: https://elibrary.ru/KLKBCN
14. Czekała, W., Malińska, K., & Cáceres, R. (2016). Co-composting of poultry manure mixtures amended with biochar — The effect of biochar on temperature and C-CO_2 emission. *Bioresource Technology*, *200*, 921–927. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.11.019
15. Ding, Y., Liu, Y., & Liu, S. (2017). Potential benefits of biochar in agricultural soils: A review. *Pedosphere*, *27*(4), 645–661. https://doi.org/10.1016/S1002-0160(17)60375-8
16. Domingues, R. R., Trugilho, P. F., & Silva, C. A. (2017). Properties of biochar derived from wood and high-nutrient biomasses with the aim of agronomic and

environmental benefits. *PLoS ONE*, *12*(5), 1–19. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0176884

17. Ezzariai, A., Hafidi, M., & Khadra, A. (2018). Human and veterinary antibiotics during composting of sludge or manure: Global perspectives on persistence, degradation, and resistance genes. *Journal of Hazardous Materials*, *359*(4), 465–481. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.07.092
18. Hua, L., Wu, W., & Liu, Y. (2009). Reduction of nitrogen loss and Cu and Zn mobility during sludge composting with bamboo charcoal amendment. *Environmental Science and Pollution Research*, *16*, 1–9. https://doi.org/10.1007/s11356-008-0041-0. EDN: https://elibrary.ru/LYQDYL
19. ISO 14240-1:1997. *Soil quality — Determination of soil microbial biomass. Part 1: Substrate-induced respiration method* (vol. 1, pp. 1–5), 1997.
20. ISO 11269-1. (2012). *Soil quality — Determination of the effects of pollutants on soil flora — Part 1: Method for the measurement of inhibition of root growth* (pp. 1–6).
21. Jindo, K., Suto, K., & Matsumoto, K. (2012). Chemical and biochemical characterisation of biochar-blended composts prepared from poultry manure. *Bioresource Technology*, *110*(3), 396–404. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.01.120
22. Kacprzak, M., Malińska, K., & Grosser, A. (2022). Cycles of carbon, nitrogen and phosphorus in poultry manure management technologies — environmental aspects. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, *10*(2), 1–25. https://doi.org/10.1080/10643389.2022.2096983. EDN: https://elibrary.ru/RLDFQT
23. Khan, N., Clark, I., & Sánchez-Monedero, M. A. (2014). Maturity indices in co-composting of chicken manure and sawdust with biochar. *Bioresource Technology*, *168*, 245–251. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.02.123
24. Kumar, M., Zhang, Z., & Wang, Q. (2017). New insight with the effects of biochar amendment on bacterial diversity as indicators of biomarkers support the thermophilic phase during sewage sludge composting. *Bioresource Technology*, *238*, 589–601. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.04.100
25. Lehmann, J., Rillig, M. C., & Thies, J. (2011). Biochar effects on soil biota – A review. *Soil Biology and Biochemistry*, *43*(9), 1812–1836. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.04.022. EDN: https://elibrary.ru/OLCSUJ
26. Liu, H., Wang, L., & Lei, M. (2019). Positive impact of biochar amendment on thermal balance during swine manure composting at relatively low ambient temperature. *Bioresource Technology*, *273*(10), 25–33. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.10.033

27. Liu, N., Zhou, J., & Han, L. (2017). Role and multi-scale characterization of bamboo biochar during poultry manure aerobic composting. *Bioresource Technology*, *241*, 190–199. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.03.144
28. López-Cano, I., Roig, A., & Cayuela, M. L. (2016). Biochar improves N cycling during composting of olive mill wastes and sheep manure. *Waste Management*, *49*, 553–559. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.12.031
29. Milon, A. R., Chang, S. W., & Ravindran, B. (2022). Biochar amended compost maturity evaluation using commercial vegetable crops seedlings through phytotoxicity germination bioassay. *Journal of King Saud University — Science*, *34*(2), 101770. https://doi.org/10.1016/j.jksus.2021.101770. EDN: https://elibrary.ru/JIDZSG
30. Nidheesh, P. V., Gopinath, A., & Ranjith, N. (2021). Potential role of biochar in advanced oxidation processes: A sustainable approach. *Chemical Engineering Journal*, *405*(5), 1–24. https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126582. EDN: https://elibrary.ru/MEDBXU
31. Qasim, W., Lee, M. H., & Moon, B. E. (2018). Composting of chicken manure with a mixture of sawdust and wood shavings under forced aeration in a closed reactor system. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, *7*(3), 261–267. https://doi.org/10.1007/s40093-018-0212-z. EDN: https://elibrary.ru/SPIOIU
32. Qian, S., Fu, Y., & Zhou, X. (2023). Biochar-compost as a new option for soil improvement: Application in various problem soils. *Science of the Total Environment*, *870*(9), 162024. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162024. EDN: https://elibrary.ru/RCBIVG
33. Sanchez-Monedero, M. A., Cayuela, M. L., & Roig, A. (2018). Role of biochar as an additive in organic waste composting. *Bioresource Technology*, *247*(9), 1155–1164. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.193
34. Sánchez, A. (2023). A perspective on the use of respiration indices beyond the measurement of the stability of compost. *Waste Management Bulletin*, *1*(2), 1–5. https://doi.org/10.1016/j.wmb.2023.05.003. EDN: https://elibrary.ru/YPBHPA
35. Sulemana, N., Nartey, E. K., & Abekoe, M. K. (2021). Use of biochar-compost for phosphorus availability to maize in a concretionary ferric lixisol in northern Ghana. *Agronomy*, *11*(2), 1–11. https://doi.org/10.3390/agronomy11020359. EDN: https://elibrary.ru/XIXBNS
36. Sun, D., Lan, Y., & Xu, E. G. (2016). Biochar as a novel niche for culturing microbial communities in composting. *Waste Management*, *54*(2), 93–100. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.05.004
37. Sun, P., Liu, B., & Ahmed, I. (2022). Composting effect and antibiotic removal under a new temperature control strategy. *Waste Management*, *153*(7), 89–

98. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.08.025. EDN: https://elibrary.ru/LSVZCX
38. Wang, M., Lv, H., & Xu, L. (2023). Screening of cold-adapted strains and its effects on physicochemical properties and microbiota structure of mushroom residue composting. *Fermentation*, *9*(4), 1–19. https://doi.org/10.3390/fermentation9040354. EDN: https://elibrary.ru/CJDACD
39. Wang, X., Cui, H., & Shi, J. (2015). Relationship between bacterial diversity and environmental parameters during composting of different raw materials. *Bioresource Technology*, *198*, 395–402. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.09.041
40. Wang, Y., Akdeniz, N., & Yi, S. (2021). Biochar-amended poultry mortality composting to increase compost temperatures, reduce ammonia emissions, and decrease leachate's chemical oxygen demand. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, *315*(3), 1–9. https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107451. EDN: https://elibrary.ru/GIZTJS
41. Widowati, A. (2014). Biochar effect on potassium fertilizer and leaching potassium dosage for two corn planting seasons. *Agrivita*, *36*(1), 65–71.
42. Zhou, Z., & Yao, H. (2020). Effects of composting different types of organic fertilizer on the microbial community structure and antibiotic resistance genes. *Microorganisms*, *8*(2), 1–20. https://doi.org/10.3390/microorganisms8020268. EDN: https://elibrary.ru/LMLATS

References

1. Galieva, G. Sh., Kuryntseva, P. A., & Galitskaya, P. Yu. (2021). Effect of biochar from chicken manure on microorganisms and plants. *Proceedings of Kazan University. Natural Sciences Series*, *163*(2), 221–237. https://doi.org/10.26907/2542-064X.2021.2.221-237. EDN: https://elibrary.ru/MDQGQM
2. Gelman, E. A., Terentieva, T. M., & Shanina, N. E. (1987). *Methods of quantitative organic elemental microanalysis* (292 pp.). Moscow: Khimiya.
3. GOST 28268-89. *Soils. Methods for determining moisture content, maximum hygroscopic moisture, and permanent wilting point moisture* (pp. 1–8). Moscow: Standartinform, 2006.
4. GOST R 8.777-2011. *State system for ensuring the uniformity of measurements. Disperse composition of aerosols and suspensions. Determination of particle sizes by laser light diffraction* (pp. 1–11). Moscow: Standartinform, 2019.
5. *Quantitative chemical analysis of soils. Method for measuring metal content in solid samples using inductively coupled plasma spectrometry* (PND F 16.1:2.3:3.11-98, pp. 1–31). Moscow, 2005.

6. Amoakwah, E., Frimpong, K., & Arthur, E. A. (2022). Biochar amendment impacts on microbial community structures and biological and enzyme activities in a weathered tropical sandy loam. *Applied Soil Ecology*, *172*(12), 104364. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.104364. EDN: https://elibrary.ru/PHGMGW
7. Antonangelo, J. A., Sun, X., & Zhang, H. (2021). The roles of co-composted biochar (COMBI) in improving soil quality, crop productivity, and toxic metal amelioration. *Journal of Environmental Management*, *277*, 1–13. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111443. EDN: https://elibrary.ru/LRXGZL
8. Arikan, O., Mulbry, W., Ingram, D., & Millner, P. (2009). Minimally managed composting of beef manure at the pilot scale: Effect of manure pile construction on pile temperature profiles and on the fate of oxytetracycline and chlortetracycline. *Bioresource Technology*, *100*(19), 4447–4453. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.12.063
9. Beisel, J. N., & Moreteau, J. C. (1997). A simple formula for calculating the lower limit of Shannon's diversity index. *Ecological Modelling*, *99*(2), 289–292. https://doi.org/10.1016/S0304-3800(97)01954-6. EDN: https://elibrary.ru/AIRYOV
10. Bernal, M. P., Alburquerque, J. A., & Moral, R. (2009). Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. A review. *Bioresource Technology*, *100*(22), 5444–5453. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.11.027
11. Bolan, S., Hou, D., & Wang, L. (2023). The potential of biochar as a microbial carrier for agricultural and environmental applications. *Science of the Total Environment*, *886*(2), 163968. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163968. EDN: https://elibrary.ru/SLCEUD
12. Chen, Y. X., Huang, X. D., & Han, Z. Y. (2010). Effects of bamboo charcoal and bamboo vinegar on nitrogen conservation and heavy metals immobility during pig manure composting. *Chemosphere*, *78*(9), 1177–1181. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2009.12.029
13. Chung, W. J., Chang, S. W., & Chaudhary, D. K. (2021). Effect of biochar amendment on compost quality, gaseous emissions and pathogen reduction during in-vessel composting of chicken manure. *Chemosphere*, *283*, 131129. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131129. EDN: https://elibrary.ru/KLKBCN
14. Czekała, W., Malińska, K., & Cáceres, R. (2016). Co-composting of poultry manure mixtures amended with biochar — The effect of biochar on temperature and C-CO_2 emission. *Bioresource Technology*, *200*, 921–927. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.11.019

15. Ding, Y., Liu, Y., & Liu, S. (2017). Potential benefits of biochar in agricultural soils: A review. *Pedosphere*, *27*(4), 645–661. https://doi.org/10.1016/S1002-0160(17)60375-8
16. Domingues, R. R., Trugilho, P. F., & Silva, C. A. (2017). Properties of biochar derived from wood and high-nutrient biomasses with the aim of agronomic and environmental benefits. *PLoS ONE*, *12*(5), 1–19. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0176884
17. Ezzariai, A., Hafidi, M., & Khadra, A. (2018). Human and veterinary antibiotics during composting of sludge or manure: Global perspectives on persistence, degradation, and resistance genes. *Journal of Hazardous Materials*, *359*(4), 465–481. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.07.092
18. Hua, L., Wu, W., & Liu, Y. (2009). Reduction of nitrogen loss and Cu and Zn mobility during sludge composting with bamboo charcoal amendment. *Environmental Science and Pollution Research*, *16*, 1–9. https://doi.org/10.1007/s11356-008-0041-0. EDN: https://elibrary.ru/LYQDYL
19. ISO 14240-1:1997. *Soil quality — Determination of soil microbial biomass. Part 1: Substrate-induced respiration method* (vol. 1, pp. 1–5), 1997.
20. ISO 11269-1. (2012). *Soil quality — Determination of the effects of pollutants on soil flora — Part 1: Method for the measurement of inhibition of root growth* (pp. 1–6).
21. Jindo, K., Suto, K., & Matsumoto, K. (2012). Chemical and biochemical characterisation of biochar-blended composts prepared from poultry manure. *Bioresource Technology*, *110*(3), 396–404. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.01.120
22. Kacprzak, M., Malińska, K., & Grosser, A. (2022). Cycles of carbon, nitrogen and phosphorus in poultry manure management technologies — environmental aspects. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, *10*(2), 1–25. https://doi.org/10.1080/10643389.2022.2096983. EDN: https://elibrary.ru/RLDFQT
23. Khan, N., Clark, I., & Sánchez-Monedero, M. A. (2014). Maturity indices in co-composting of chicken manure and sawdust with biochar. *Bioresource Technology*, *168*, 245–251. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.02.123
24. Kumar, M., Zhang, Z., & Wang, Q. (2017). New insight with the effects of biochar amendment on bacterial diversity as indicators of biomarkers support the thermophilic phase during sewage sludge composting. *Bioresource Technology*, *238*, 589–601. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.04.100
25. Lehmann, J., Rillig, M. C., & Thies, J. (2011). Biochar effects on soil biota – A review. *Soil Biology and Biochemistry*, *43*(9), 1812–1836. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.04.022. EDN: https://elibrary.ru/OLCSUJ

26. Liu, H., Wang, L., & Lei, M. (2019). Positive impact of biochar amendment on thermal balance during swine manure composting at relatively low ambient temperature. *Bioresource Technology*, *273*(10), 25–33. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.10.033
27. Liu, N., Zhou, J., & Han, L. (2017). Role and multi-scale characterization of bamboo biochar during poultry manure aerobic composting. *Bioresource Technology*, *241*, 190–199. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.03.144
28. López-Cano, I., Roig, A., & Cayuela, M. L. (2016). Biochar improves N cycling during composting of olive mill wastes and sheep manure. *Waste Management*, *49*, 553–559. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.12.031
29. Milon, A. R., Chang, S. W., & Ravindran, B. (2022). Biochar amended compost maturity evaluation using commercial vegetable crops seedlings through phytotoxicity germination bioassay. *Journal of King Saud University — Science*, *34*(2), 101770. https://doi.org/10.1016/j.jksus.2021.101770. EDN: https://elibrary.ru/JIDZSG
30. Nidheesh, P. V., Gopinath, A., & Ranjith, N. (2021). Potential role of biochar in advanced oxidation processes: A sustainable approach. *Chemical Engineering Journal*, *405*(5), 1–24. https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126582. EDN: https://elibrary.ru/MEDBXU
31. Qasim, W., Lee, M. H., & Moon, B. E. (2018). Composting of chicken manure with a mixture of sawdust and wood shavings under forced aeration in a closed reactor system. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, *7*(3), 261–267. https://doi.org/10.1007/s40093-018-0212-z. EDN: https://elibrary.ru/SPIOIU
32. Qian, S., Fu, Y., & Zhou, X. (2023). Biochar-compost as a new option for soil improvement: Application in various problem soils. *Science of the Total Environment*, *870*(9), 162024. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162024. EDN: https://elibrary.ru/RCBIVG
33. Sanchez-Monedero, M. A., Cayuela, M. L., & Roig, A. (2018). Role of biochar as an additive in organic waste composting. *Bioresource Technology*, *247*(9), 1155–1164. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.193
34. Sánchez, A. (2023). A perspective on the use of respiration indices beyond the measurement of the stability of compost. *Waste Management Bulletin*, *1*(2), 1–5. https://doi.org/10.1016/j.wmb.2023.05.003. EDN: https://elibrary.ru/YPBHPA
35. Sulemana, N., Nartey, E. K., & Abekoe, M. K. (2021). Use of biochar-compost for phosphorus availability to maize in a concretionary ferric lixisol in north-

ern Ghana. *Agronomy*, *11*(2), 1–11. https://doi.org/10.3390/agronomy11020359. EDN: https://elibrary.ru/XIXBNS

36. Sun, D., Lan, Y., & Xu, E. G. (2016). Biochar as a novel niche for culturing microbial communities in composting. *Waste Management*, *54*(2), 93–100. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.05.004
37. Sun, P., Liu, B., & Ahmed, I. (2022). Composting effect and antibiotic removal under a new temperature control strategy. *Waste Management*, *153*(7), 89–98. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.08.025. EDN: https://elibrary.ru/LSVZCX
38. Wang, M., Lv, H., & Xu, L. (2023). Screening of cold-adapted strains and its effects on physicochemical properties and microbiota structure of mushroom residue composting. *Fermentation*, *9*(4), 1–19. https://doi.org/10.3390/fermentation9040354. EDN: https://elibrary.ru/CJDACD
39. Wang, X., Cui, H., & Shi, J. (2015). Relationship between bacterial diversity and environmental parameters during composting of different raw materials. *Bioresource Technology*, *198*, 395–402. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.09.041
40. Wang, Y., Akdeniz, N., & Yi, S. (2021). Biochar-amended poultry mortality composting to increase compost temperatures, reduce ammonia emissions, and decrease leachate's chemical oxygen demand. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, *315*(3), 1–9. https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107451. EDN: https://elibrary.ru/GIZTJS
41. Widowati, A. (2014). Biochar effect on potassium fertilizer and leaching potassium dosage for two corn planting seasons. *Agrivita*, *36*(1), 65–71.
42. Zhou, Z., & Yao, H. (2020). Effects of composting different types of organic fertilizer on the microbial community structure and antibiotic resistance genes. *Microorganisms*, *8*(2), 1–20. https://doi.org/10.3390/microorganisms8020268. EDN: https://elibrary.ru/LMLATS

ВКЛАД АВТОРОВ

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку статьи для публикации.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

The authors contributed equally to this article.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Данилова Наталья Викторовна, к-т биол. наук, старший преподаватель кафедры биотехнологии

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет»
ул. Кремлевская, 18, г. Казань, 420008, Российская Федерация
natasha-danilova91@mail.ru

Бикташева Лилия Рамилевна, к-т биол. наук, старший преподаватель кафедры биотехнологии
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет»
ул. Кремлевская, 18, г. Казань, 420008, Российская Федерация
biktasheval@mail.ru

Курынцева Полина Александровна, к-т биол. наук, доцент кафедры биотехнологии
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет»
ул. Кремлевская, 18, г. Казань, 420008, Российская Федерация
polinazwerewa@yandex.ru

Галицкая Полина Юрьевна, доктор биол. наук, главный научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории OpenLab «Биоконтроль»
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет»
ул. Кремлевская, 18, г. Казань, 420008, Российская Федерация
gpolina33@yandex.ru

Селивановская Светлана Юрьевна, доктор биол. наук, профессор кафедры биотехнологии
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет»
ул. Кремлевская, 18, г. Казань, 420008, Российская Федерация
Svetlana.Selivanovskaya@kpfu.ru

DATA ABOUT THE AUTHORS

Natalia V. Danilova, PhD (Biology), Senior Lecturer, Department of Biotechnology
Kazan (Volga Region) Federal University
18, Kremlevskaya Str., Kazan, 420008, Russian Federation
natasha-danilova91@mail.ru
SPIN-code: 5696-2506
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8750-0929
ResearcherID: AAI-8891-2020
Scopus Author ID: 57200701116

Liliya R. Biktasheva, PhD (Biology), Senior Lecturer, Department of Biotechnology
Kazan (Volga Region) Federal University
18, Kremlevskaya Str., Kazan, 420008, Russian Federation
biktasheval@mail.ru
SPIN-code: 2867-4922
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1133-444X
ResearcherID: N-3675-2016
Scopus Author ID: 56358635400

Polina A. Kuryntseva, PhD (Biology), associate professor, Department of Biotechnology
Kazan (Volga Region) Federal University
18, Kremlevskaya Str., Kazan, 420008, Russian Federation
polinazwerewa@yandex.ru
SPIN-code: 7028-8557
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9274-7077
ResearcherID: M-3407-2016
Scopus Author ID: 56069925000

Polina Yu. Galitskaya, Doctor of Biological Sciences, Chief Scientist of the OpenLab “Biocontrol” research laboratory
Kazan (Volga Region) Federal University
18, Kremlevskaya Str., Kazan, 420008, Russian Federation
gpolina33@yandex.ru
SPIN-code: 5429-0714
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5070-786X

ResearcherID: L-8847-2013
Scopus Author ID: 36165160200

Svetlana Yu. Selivanovskaya, Doctor of Biological Sciences, Professor, Department of Biotechnology
Kazan (Volga Region) Federal University
18, Kremlevskaya Str., Kazan, 420008, Russian Federation
Svetlana.Selivanovskaya@kpfu.ru
SPIN-code: 4867-6900
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6379-7166
ResearcherID: L-8851-2013
Scopus Author ID: 6603604965

Поступила 21.10.2024 Received 21.10.2024
После рецензирования 14.12.2024 Revised 14.12.2024
Принята 30.01.2025 Accepted 30.01.2025

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-4-1269 **EDN: FJVFJI**
УДК 634.8.042:551.586/524.33

CC BY NC ND

Научная статья

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ИНДЕКСА ПРОХЛАДНОСТИ НОЧЕЙ (CI) НА ТЕРРИТОРИИ КРЫМСКОГО ПОЛУОСТРОВА

Е.А. Рыбалко, Н.В. Баранова, А.С. Ерхова

Аннотация

Обоснование. Одним из важнейших индексов, используемых в виноградарстве, является индекс прохладности ночей – Cool Night Index (CI), характеризующий условия накопления красящих и ароматических веществ при созревании винограда.

Цель. Изучить пространственное распределение индекса прохладности ночей (CI) на территории Крымского полуострова.

Материалы и методы. В работе использованы суточные данные 16 метеостанций Крымского полуострова за 2006-2014 и 2017-2020 гг., полученные с ресурса https://rp5.ru/ и верифицированные на основании официальных декадных данных, предоставленных ФГБУ «Крымское УГМС». Для анализа пространственного распределения морфометрических особенностей рельефа использована цифровая модель рельефа SRTM-3. Пространственные данные были проанализированы и смоделированы при помощи геоинформационной системы QGIS Desktop. Индекс прохладности ночей рассчитан в соответствии с резолюцией МОВВ 423-2012. Коэффициенты математической модели были определены с помощью метода наименьших квадратов.

Результаты. В ходе проведённого исследования были собраны и проанализированы метеорологические данные, полученные с 16 метеорологических станций, расположенных на территории Крымского полуострова, необходимые для расчёта индекса прохладности ночей; на метеорологических станциях Крымского полуострова была рассчитана величина индекса прохладности ночей; разработана математическая модель, позволяющая оценить влияние геоморфологических факторов на пространственное распределение индекса прохладности ночей; создана крупномасштабная цифровая карта, демонстрирующая пространственное распределение индекса прохладности ночей на тер-

ритории Крымского полуострова; изучено соотношение площадей территорий с различными диапазонами индекса прохладности ночей согласно общепринятой классификации. Крымский полуостров обладает широким диапазоном варьирования индекса прохладности ночей, что позволяет при правильном сочетании сортов винограда и территории для их выращивания получать широкую линейку виноградарско-винодельческой продукции высокого качества.

Ключевые слова: индекс прохладности ночей; метеорологические данные; математическая модель; геоинформационное моделирование

Для цитирования. Рыбалко, Е. А., Баранова, Н. В., & Ерхова, А. С. (2025). Пространственное распределение индекса прохладности ночей (CI) на территории Крымского полуострова. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(4), 94-108. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-4-1269

Original article

SPATIAL DISTRIBUTION OF THE COOL NIGHT INDEX (CI) ON THE TERRITORY OF THE CRIMEAN PENINSULA

E.A. Rybalko, N.V. Baranova, A.S. Erkhova

Abstract

Background. One of the most important indices used in viticulture is the Cool Night Index (CI), which characterizes the conditions of accumulation of coloring and aromatic substances during grape ripening.

Purpose. To study the spatial distribution of the Cool Night Index (CI) on the territory of the Crimean Peninsula.

Materials and methods. Daily data from 16 meteorological stations of the Crimean Peninsula for 2006-2014 and 2017-2020 obtained from the resource https://rp5.ru/ and verified on the basis of official decade data provided by Federal State Budgetary Institution Crimean Administration on Hydrometeorology and Environmental Monitoring were used. The SRTM-3 digital elevation model was used to analyze the spatial distribution of morphometric relief features. Spatial data analysis and modeling were carried out using GIS QGIS Desktop. Calculation of the Cool Night Index was carried out in accordance with Resolution OIV 423-2012. The coefficients in the mathematical model were selected using the least squares method.

Results. As a result of this work long-term meteorological data on 16 meteorological stations of the Crimean Peninsula necessary for calculating the Cool Night

Index have been collected and analyzed; the value of the Cool Night Index at meteorological stations of the Crimean Peninsula has been calculated; a mathematical model describing the regularities of spatial variation of the Cool Night Index under the influence of geomorphological characteristics of the area has been built; a large-scale digital map of the spatial distribution of the Cool Night Index on the territory of the Crimean Peninsula has been built; the ratio of the areas of territories with different ranges of the Cool Night Index according to the generally accepted classification has been analyzed. The Crimean peninsula has a wide range of variation of the Cool Night Index allows with the right combination of grape varieties and the territory for their cultivation to obtain a wide range of high quality viticultural and wine-making products.

Keywords: Cool Night Index; meteorological data; mathematical model; geoinformation modeling

For citation. Rybalko, E. A., Baranova, N. V., & Erkhova, A. S. (2025). Spatial distribution of the Cool Night Index (CI) on the territory of the Crimean Peninsula. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(4), 94-108. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-4-1269

Введение

Климат выступает в качестве одного из доминирующих экологических факторов, формирующих терруар. От него зависит количество и качество урожая винограда и получаемой из него продукции. Под влиянием климатических условий в винограде накапливаются первичные и вторичные метаболиты, предопределяющие качественные характеристики вина [7; 15].

Температурный режим региона является ведущим климатическим фактором, влияющим на возможность культивирования винограда в данной местности [2; 3; 4; 21]. Решающее значение погодные условия оказывают в течение периода созревания [12].

В оценке пригодности регионов для выращивания винограда и производства вина широко применяются биоклиматические индексы.

Одним из ключевых показателей, применяемых в виноградарстве, является индекс прохладности ночей (Cool Night Index CI), который отражает условия формирования красящих и ароматических веществ во время созревания винограда [19]. Этот показатель представляет собой среднеарифметическое значение минимальных суточных температур воздуха в течение периода созревания – сентября в северном полушарии или марта в южном. Поскольку для производства качественных вин большое значение имеет технологический запас фенольных соединений в винограде [1],

данный индекс широко используется в странах развитого виноградарства, поскольку отражает условия формирования качественных характеристик виноградарско-винодельческой продукции.

Многочисленные работы посвящены изучению данного индекса. В проведенных исследованиях было выявлено, что прохладные ночные температуры способствуют накоплению сахаров, ограничивают вегетативный рост [9; 16]. Также имеются результаты исследований, согласно которым низкая ночная температура во время созревания способствует накоплению антоцианов в винограде сорта Корвина [10]. В других работах приведен оптимальный температурный диапазон для накопления антоцианов в винограде, который находится в пределах от 17 до 26 °C [17; 18]. По мнению Gladstones J.S., оптимальная для накопления красящих и ароматических веществ температура в период созревания винограда должна колебаться в течение суток от 14 °C ночью до 26 °C днём [11].

Важность индекса прохладности ночей для характеристики виноградарско-винодельческих терруаров подчёркивается в работе Tonietto, J., Carbonneau, A., где предлагается всемирная классификация типов климата применительно к винограду, основанная всего лишь на трёх индексах, в том числе индексе прохладности ночей [20].

Климатические индексы, в том числе индекс прохладности ночей, имеют широкое пространственное варьирование под влиянием геоморфологических параметров местности, поэтому важным вопросом является разработка методики пространственного интерполирования точечных значений индексов, полученных, к примеру, на метеостанциях [5; 6; 13; 14].

Таким образом, проведение исследований по данному индексу является крайне важным для научно обоснованного выделения виноградарско-винодельческих терруаров и оценки их потенциала для производства высококачественной продукции.

Цель исследования – изучить пространственное распределение индекса прохладности ночей (CI) на территории Крымского полуострова.

Научная новизна. Впервые на основании авторской математической модели создана цифровая крупномасштабная карта пространственного распределения индекса прохладности ночей на территории Крымского полуострова.

Материалы и методы

Исследования проведены в секторе агроэкологии ФГБУН «ВННИИВиВ «Магарач» РАН». В работе использованы многолетние суточные

данные за 2006-2014 и 2017-2020 гг., с 16 метеостанций Крымского полуострова, полученные с ресурса https://rp5.ru/ и верифицированные на основании официальных декадных данных, предоставленных ФГБУ «Крымское УГМС». Для анализа пространственного распределения морфометрических особенностей рельефа использована цифровая модель рельефа SRTM-3 с пространственным разрешением 3 угловые секунды. Пространственные данные были проанализированы и смоделированы при помощи геоинформационной системы QGIS Desktop. Индекс прохладности ночей рассчитан в соответствии с резолюцией МОВВ 423-2012 [8]. Коэффициенты математической модели были определены с помощью метода наименьших квадратов.

Результаты исследования

Для изучения закономерностей пространственного распределения индекса прохладности ночей была сформирована сеть из 16 опорных точек, координаты которых соответствуют расположению метеорологических станций, подлежащих анализу. Используя геоинформационные системы (ГИС), для каждой опорной точки были определены значения факторов, потенциально оказывающих влияние на пространственное распределение индекса прохладности ночей. К таким факторам относятся: экспозиция и крутизна склона, географическая широта, абсолютная высота над уровнем моря, удалённость от крупных водоёмов, а также разница между абсолютной высотой опорной точки над уровнем моря и средним значением абсолютной высоты в радиусе 1 км от опорной точки (показатель, математически описывающий положение анализируемой точки на формах мезорельефа – нижняя, средняя или верхняя часть склона, дно долины, вершина холма и т.д.) (таблица 1).

Таблица 1.

Характеристика проанализированных метеостанций

Метеостанция		Высота, м	Широта, градусы	Уклон, градусы	Экспозиция, градусы	Расстояние до моря, км	Δh,* м
Название	Индекс						
Ай-Петри	33998	1166	44,46458	23	126	5,1	107,8
Алушта	33959	34	44,68353	11	193	0,7	-15,3
Белогорск	33966	201	45,04627	2	11	28,0	7,4
Джанкой	33934	9	45,72858	0	-	10,6	-3,0
Евпатория	33929	6	45,18276	2	157	0,1	-7,7
Ишунь	33933	2	45,94745	1	270	1,4	-3,4

Керчь	33983	1	45,36493	1	141	0,1	-8,0
Клепинино	33939	36	45,53843	1	198	53,0	0,3
Никита	33995	205	44,50472	8	188	0,9	21,8
Нижнегорский	33962	25	45,45492	0	-	19,0	2,8
Почтовое	33945	167	44,83849	4	206	27,0	-6,8
Севастополь	33991	60	44,56888	1	288	2,1	-2,4
Симферополь	33946	183	45,04854	1	202	30,0	3,0
Феодосия	33976	10	45,03163	2	90	0,1	-10,5
Черноморское	33924	6	45,52985	1	243	0,3	-0,3
Ялта	33990	80	44,47503	6	95	0,3	6,7

*- разница между абсолютной высотой метеостанции над уровнем моря и средним значением абсолютной высоты в радиусе 1 км от метеостанции

На основании анализа вышеуказанных характеристик метеостанций и рассчитанных по метеорологическим данным уровней индекса прохладности ночей построена математическая модель, описывающая закономерности пространственного варьирования индекса (1):

$$CI_1 = CI + 0{,}007(h - h_1) - 0{,}01(\Delta h - \Delta h_1) - 2{,}2(4^{-0{,}2 * r} - 4^{-0{,}2 * r1}) + \\ + 3(x - x_1) - 0{,}8(\operatorname{tg} i_1 \cos a_1 - \operatorname{tg} i \cos a) \quad (1)$$

где CI – индекс прохладности ночей на метеостанции;

CI_1 – индекс прохладности ночей в рассчитываемой точке;

h – высота над уровнем моря метеостанции, м;

h_1 – высота над уровнем моря рассчитываемой точки, м;

Δh – разница между абсолютной высотой метеостанции над уровнем моря и средним значением абсолютной высоты в радиусе 1 км от метеостанции, м;

Δh_1 – разница между абсолютной высотой рассчитываемой точки над уровнем моря и средним значением абсолютной высоты в радиусе 1 км от рассчитываемой точки, м;

r – расстояние от метеостанции до моря, км;

r_1 – расстояние от рассчитываемой точки до моря, км;

x – географическая широта метеостанции, градусы;

x_1 – географическая широта рассчитываемой точки, градусы;

i – крутизна склона в районе метеостанции, градусы;

i_1 – крутизна склона в районе рассчитываемой точки, градусы;

a – экспозиция склона в районе метеостанции, градусы;

a_1 – экспозиция склона в районе рассчитываемой точки, градусы.

Данная модель позволяет рассчитать значение индекса прохладности ночей в любой точке пространства на основании различий в геоморфологических характеристиках данной точки и ближайшей метеостанции с известным значением индекса.

Для проверки разработанной модели с её помощью произведён расчёт величины индекса прохладности ночей на всех анализируемых метеостанциях по данным одной метеостанции Симферополь, которая принята за базовую. Полученные расчётные данные сравнили с фактическими уровнями индекса, вычисленными по данным фактических метеонаблюдений (таблица 2).

Таблица 2.

Оценка точности модели для расчёта индекса прохладности ночей (CI).

Метеостанция	Значение CI		Абсолютная ошибка	Относительная ошибка, %
	фактическое	расчётное		
Ай-Петри	9,82	9,82	0,00	0,0
Алушта	17,81	17,00	-0,81	4,6
Белогорск	11,91	13,07	1,16	9,7
Джанкой	13,82	12,40	-1,42	10,3
Евпатория	16,02	16,04	0,02	0,1
Ишунь	13,97	13,15	-0,82	5,9
Керчь	15,24	15,50	0,26	1,7
Клепинино	12,49	12,71	0,22	1,7
Никита	17,65	16,66	-0,99	5,6
Нижнегорский	12,28	13,07	0,79	6,5
Почтовое	12,37	13,87	1,50	12,1
Севастополь	15,63	16,62	0,99	6,3
Симферополь	13,17	13,17	0,00	0,0
Феодосия	16,3	16,44	0,14	0,8
Черноморское	14,98	14,95	-0,03	0,2
Ялта	17,72	17,66	-0,06	0,3

Используя многолетние метеорологические данные с метеостанций Крымского полуострова и разработанную математическую модель, с применением методов геоинформационного моделирования была создана цифровая карта пространственного распределения индекса прохладности ночей на территории Крымского полуострова. Произведена классификация значений индекса согласно общепринятым диапазонам (рисунок 1).

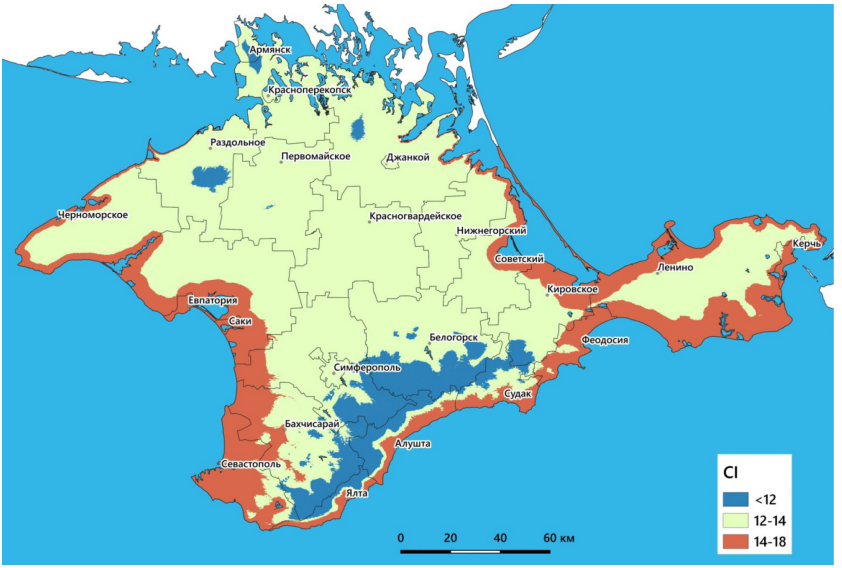


Рис. 1. Карта пространственного распределения индекса прохладности ночей

На основании разработанной карты вычислены площади земель с различными уровнями индекса прохладности ночей (таблица 3).

Таблица 3.

Соотношение территорий Крымского полуострова с различными уровнями индекса прохладности ночей (CI)

CI	Площадь	
	тыс. га	%
<12	222,36	8,7
12-14	1767,94	69,0
14-18	571,8	22,3

Обсуждение

Средняя квадратичная ошибка разработанной математической модели составила 0,78, средняя относительная ошибка – 1,2 %, $R^2 = 0,89$.

Следует отметить, что использование метеостанции Симферополь, расположенной в Предгорной части Крымского полуострова, в качестве базовой станции для расчетов индекса с помощью модели продемонстрировало высокую точность не только в условиях, схожих с условиями в Симферополе, но

и в условиях степной зоны и равнинного рельефа (метеостанции Клепинино, Евпатория), а также в горном рельефе (метеостанция Ай-Петри). Кроме того, разработанная модель показала высокую точность расчётов независимо от расстояния расчётной точки до моря или другого крупного водоёма.

Также следует обратить внимание на то, что точки, для которых производился тестовый расчёт индекса с помощью модели, значительно удалены от базовой метеостанции Симферополь: Черноморское – 127 км, Керчь – 186 км. В реальных условиях для оценки конкретного участка для выращивания винограда расчёты будут вестись по данным ближайшей метеостанции, которая в большинстве случаев будет удалена всего на 10-30 км. Таким образом, в реальных условиях точность расчётов с использованием разработанной модели будут ещё выше, чем в тестовых условиях.

Согласно результатам проведённых исследований, на территории Крымского полуострова встречается три из четырёх общепринятых диапазонов индекса прохладности ночей. Отсутствуют территории с индексом выше 18, соответствующим градации «тёплые ночи». Значение индекса менее 12, соответствующее градации «очень холодные ночи» встречается на 8,7 % территории полуострова – преимущественно в горах и предгорье. Преобладающая часть Крымского полуострова (69 %) относится к градации «прохладные ночи», а 22,3 % территории (западное, южное и восточное побережье) соответствует градации «умеренные ночи».

Таким образом, Крымский полуостров обладает широким диапазоном варьирования индекса прохладности ночей, что позволяет при правильном сочетании сортов винограда и территории для их выращивания получать широкую линейку виноградарско-винодельческой продукции высокого качества.

Заключение

1. По 16 метеостанциям Крымского полуострова были собраны и проанализированы многолетние метеорологические данные с трёхчасовой детализацией, необходимые для вычисления индекса прохладности ночей.

2. Проведены расчеты значения индекса прохладности ночи на метеорологических станциях, расположенных на территории Крымского полуострова.

3. Построена математическая модель, описывающая закономерности пространственного варьирования индекса прохладности ночей под влиянием геоморфологических характеристик местности.

4. Создана цифровая крупномасштабная карта пространственного распределения индекса прохладности ночей на территории Крымского полуострова.

5. Проанализировано соотношение площадей территорий с различными диапазонами индекса прохладности ночей согласно общепринятой классификации.

Информация о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация о спонсорстве. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 25-26-00028).

Список литературы

1. Маркосов, В. А., Агеева, Н. М., Ничвидюк, О. В., Даниелян, А. Ю., & Тургенев, В. В. (2020). Изменение концентрации фенольных соединений в винограде Пино нуар и приготовленных из него виноматериалах. *«Магарач». Виноградарство и виноделие*, *22*(3), 260–265. https://doi.org/10.35547/IM.2020.22.3.015. EDN: https://elibrary.ru/CARDWL
2. Остроухова, Е. В., Рыбалко, Е. А., Пескова, И. В., Баранова, Н. В., Левченко, С. В., Луткова, Н. Ю., Романов, А. В., Бойко, В. А., & Евстафьева, О. Ю. (2022). Влияние теплообеспеченности виноградников на формирование физико-химических характеристик и качества винограда и вина сорта Кокур белый. *«Магарач». Виноградарство и виноделие*, *24*(3/121), 278–285. https://doi.org/10.34919/IM.2022.24.3.012. EDN: https://elibrary.ru/EGINTE
3. Рыбалко, Е. А., & Баранова, Н. В. (2022). Анализ территориального распределения климатических факторов, характеризующих теплообеспеченность территории Крымского полуострова. *Плодоводство и виноградарство Юга России*, *75*(3), 107–118. https://doi.org/10.30679/2219-5335-2022-3-75-107-118. EDN: https://elibrary.ru/LMZVXH
4. Рыбалко, Е. А., & Баранова, Н. В. (2022). Выделение ампелоэкотопов на территории Крымского полуострова. *Плодоводство и виноградарство Юга России*, *77*(5), 68–81. https://doi.org/10.30679/2219-5335-2022-5-77-68-81. EDN: https://elibrary.ru/KFVPGS
5. Alsafadi, K., Bi, S., Bashir, B., Sharifi, E., Alsalman, A., Kumar, A., & Shahid, S. (2023). High-resolution precipitation modeling in complex terrains using hybrid interpolation techniques: Incorporating physiographic and MODIS cloud cover influences. *Remote Sensing*, *15*, 2435. https://doi.org/10.3390/rs15092435. EDN: https://elibrary.ru/IHHCHT
6. Bonnardot, V., Carey, V. A., Madelin, M., Cautenet, S., Coetzee, Z., & Quénol, H. (2012). Spatial variability of night temperatures at a fine scale over the Stellenbosch wine district, South Africa. *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin*, *46*(1), 1–13. https://doi.org/10.20870/oeno-one.2012.46.1.1504

7. Cogato, A., Meggio, F., Pirotti, F., Cristante, A., & Marinello, F. (2019). Analysis and impact of recent climate trends on grape composition in north-east Italy. *BIO Web of Conferences*, *13*, 04014. https://doi.org/10.1051/bioconf/20191304014
8. Van Leeuwen, C., & Bois, B. (2018). Update in unified terroir zoning methodologies. *2E3S Web of Conferences. XII Congreso Internacional Terroir*, *50*, 6. https://doi.org/10.1051/e3sconf/20185001044
9. Falcao, L. D., de Revel, G., Perello, M. C., Moutsiou, A., Zanus, M. C., & Bordignon-Luiz, M. T. A. (2007). Survey of seasonal temperatures and vineyard altitude influences on 2-methoxy-3-isobutylpyrazine, C13-norisoprenoids, and the sensory profile of Brazilian Cabernet Sauvignon wines. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *55*, 3605–3612. https://doi.org/10.1021/jf070185u
10. Gaiotti, F., Pastore, C., Filippetti, I., Lovat, L., Belfiore, N., & Tomasi, D. (2018). Low night temperature at veraison enhances the accumulation of anthocyanins in Corvina grapes (Vitis Vinifera L.). *Scientific Reports*, *8*(1). https://doi.org/10.1038/s41598-018-26921-4
11. Gladstones, J. S. (2011). *Wine, terroir and climate change* (p. 279). Wakefield Press. ISBN: 978-1-86254-924-1
12. Gonzalez Perez, L. A., Bavaresco, L., & Neethling, E. (2018). Role of natural terroir attributes on Barbera grapevine performance and grape quality in Piemonte region (Italy). *E3S Web of Conferences. XII Congreso Internacional Terroir*, *50*, 2. https://doi.org/10.1051/e3sconf/20185002004
13. Jones, G. V. (2005). Climate change in the western United States grape growing regions. *Acta Horticulturae*, *689*, 41–60. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2005.689.2
14. Karlik, L., Gabor, M., Faltan, V., & Havlivek, M. (2018). Vineyard zonation based on natural terroir factors using multivariate statistics — Case study Burgenland (Austria). *OENO One*, *52*(2), 105–117. https://doi.org/10.20870/oeno-one.2018.52.2.1907
15. Maracineanul, L. C., Giugea, N., Gofita, I., & Capruciu, R. (2024). Climate evaluation of viticulture in Oltenia. Case study: Cetate — Dolj. *Annals of the University of Craiova — Agriculture Montanology Cadastre Series*, *53*, 100–103. https://doi.org/10.52846/aamc.v53i2.1510. EDN: https://elibrary.ru/NSKSMU
16. Palliotti, A., Tombesi, S., Silvestroni, O., Lanari, V., Gatti, M., & Poni, S. (2014). Changes in vineyard establishment and canopy management urged by earlier climate-related grape ripening: A review. *Scientia Horticulturae*, *178*, 43–54. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.07.039
17. Pirie, A. (1977). *Phenolics accumulation in red wine grapes (Vitis vinifera L.)* [Ph.D. thesis]. University of Sydney, Camperdown, Australia.

18. Rustioni, L., Rossoni, M., Calatroni, M., & Failla, O. (2015). Influence of bunch exposure on anthocyanins extractability from grape skins. *Vitis — Journal of Grapevine Research*, *50*, 137–143. https://doi.org/10.5073/vitis.2011.50.137-143
19. Tonietto, J. (1999). *Les macroclimats viticoles mondiaux et l'influence du mésoclimat sur la typicité de la Syrah et du Muscat de Hambourg dans le sud de la France — Méthodologie de caractérisation* [Doctoral thesis]. Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier, Montpellier, France (p. 216).
20. Tonietto, J., & Carbonneau, A. A. (2004). Multicriteria climatic classification system for grape-growing regions worldwide. *Agricultural and Forest Meteorology*, *124*, 81–97. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2003.06.001
21. Yilmaz, T. (2024). Understanding the influence of extreme cold on grapevine phenology in South Dakota's dormant season: Implications for sustainable viticulture. *Applied Fruit Science*, *66*, 1–8. https://doi.org/10.1007/s10341-024-01075-y. EDN: https://elibrary.ru/MTFEMU

References

1. Markosov, V. A., Ageeva, N. M., Nichvidyuk, O. V., Danielyan, A. Yu., & Turgenev, V. V. (2020). Changes in phenolic compound concentration in Pinot Noir grapes and wine materials produced from them. *«Magarach». Viticulture and Winemaking*, *22*(3), 260–265. https://doi.org/10.35547/IM.2020.22.3.015. EDN: https://elibrary.ru/CARDWL
2. Ostroukhova, E. V., Rybalko, E. A., Peskova, I. V., Baranova, N. V., Levchenko, S. V., Lutkova, N. Yu., Romanov, A. V., Boyko, V. A., & Evstafieva, O. Yu. (2022). Influence of thermal resources of vineyards on the formation of physical and chemical characteristics and quality of Kokur Belyi grape and wine. *«Magarach». Viticulture and Winemaking*, *24*(3/121), 278–285. https://doi.org/10.34919/IM.2022.24.3.012. EDN: https://elibrary.ru/EGINTE
3. Rybalko, E. A., & Baranova, N. V. (2022a). Analysis of territorial distribution of climatic factors characterizing thermal resources of the Crimean Peninsula. *Fruit Growing and Viticulture in the South of Russia*, *75*(3), 107–118. https://doi.org/10.30679/2219-5335-2022-3-75-107-118. EDN: https://elibrary.ru/LMZVXH
4. Rybalko, E. A., & Baranova, N. V. (2022b). Identification of ampeloecotopes in the Crimean Peninsula. *Fruit Growing and Viticulture in the South of Russia*, *77*(5), 68–81. https://doi.org/10.30679/2219-5335-2022-5-77-68-81. EDN: https://elibrary.ru/KFVPGS
5. Alsafadi, K., Bi, S., Bashir, B., Sharifi, E., Alsalman, A., Kumar, A., & Shahid, S. (2023). High-resolution precipitation modeling in complex terrains using hybrid

interpolation techniques: Incorporating physiographic and MODIS cloud cover influences. *Remote Sensing*, *15*, 2435. https://doi.org/10.3390/rs15092435. EDN: https://elibrary.ru/IHHCHT

6. Bonnardot, V., Carey, V. A., Madelin, M., Cautenet, S., Coetzee, Z., & Quénol, H. (2012). Spatial variability of night temperatures at a fine scale over the Stellenbosch wine district, South Africa. *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin*, *46*(1), 1–13. https://doi.org/10.20870/oeno-one.2012.46.1.1504
7. Cogato, A., Meggio, F., Pirotti, F., Cristante, A., & Marinello, F. (2019). Analysis and impact of recent climate trends on grape composition in north-east Italy. *BIO Web of Conferences*, *13*, 04014. https://doi.org/10.1051/bioconf/20191304014
8. Van Leeuwen, C., & Bois, B. (2018). Update in unified terroir zoning methodologies. *2E3S Web of Conferences. XII Congreso Internacional Terroir*, *50*, 6. https://doi.org/10.1051/e3sconf/20185001044
9. Falcao, L. D., de Revel, G., Perello, M. C., Moutsiou, A., Zanus, M. C., & Bordignon-Luiz, M. T. A. (2007). Survey of seasonal temperatures and vineyard altitude influences on 2-methoxy-3-isobutylpyrazine, C13-norisoprenoids, and the sensory profile of Brazilian Cabernet Sauvignon wines. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *55*, 3605–3612. https://doi.org/10.1021/jf070185u
10. Gaiotti, F., Pastore, C., Filippetti, I., Lovat, L., Belfiore, N., & Tomasi, D. (2018). Low night temperature at veraison enhances the accumulation of anthocyanins in Corvina grapes (Vitis Vinifera L.). *Scientific Reports*, *8*(1). https://doi.org/10.1038/s41598-018-26921-4
11. Gladstones, J. S. (2011). *Wine, terroir and climate change* (p. 279). Wakefield Press. ISBN: 978-1-86254-924-1
12. Gonzalez Perez, L. A., Bavaresco, L., & Neethling, E. (2018). Role of natural terroir attributes on Barbera grapevine performance and grape quality in Piemonte region (Italy). *E3S Web of Conferences. XII Congreso Internacional Terroir*, *50*, 2. https://doi.org/10.1051/e3sconf/20185002004
13. Jones, G. V. (2005). Climate change in the western United States grape growing regions. *Acta Horticulturae*, *689*, 41–60. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2005.689.2
14. Karlik, L., Gabor, M., Faltan, V., & Havlivek, M. (2018). Vineyard zonation based on natural terroir factors using multivariate statistics — Case study Burgenland (Austria). *OENO One*, *52*(2), 105–117. https://doi.org/10.20870/oeno-one.2018.52.2.1907
15. Maracineanul, L. C., Giugea, N., Gofita, I., & Capruciu, R. (2024). Climate evaluation of viticulture in Oltenia. Case study: Cetate — Dolj. *Annals of the University of Craiova — Agriculture Montanology Cadastre Series*, *53*, 100–103. https://doi.org/10.52846/aamc.v53i2.1510. EDN: https://elibrary.ru/NSKSMU

16. Palliotti, A., Tombesi, S., Silvestroni, O., Lanari, V., Gatti, M., & Poni, S. (2014). Changes in vineyard establishment and canopy management urged by earlier climate-related grape ripening: A review. *Scientia Horticulturae*, *178*, 43–54. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.07.039
17. Pirie, A. (1977). *Phenolics accumulation in red wine grapes (Vitis vinifera L.)* [Ph.D. thesis]. University of Sydney, Camperdown, Australia.
18. Rustioni, L., Rossoni, M., Calatroni, M., & Failla, O. (2015). Influence of bunch exposure on anthocyanins extractability from grape skins. *Vitis — Journal of Grapevine Research*, *50*, 137–143. https://doi.org/10.5073/vitis.2011.50.137-143
19. Tonietto, J. (1999). *Les macroclimats viticoles mondiaux et l'influence du mésoclimat sur la typicité de la Syrah et du Muscat de Hambourg dans le sud de la France — Méthodologie de caractérisation* [Doctoral thesis]. Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier, Montpellier, France (p. 216).
20. Tonietto, J., & Carbonneau, A. A. (2004). Multicriteria climatic classification system for grape-growing regions worldwide. *Agricultural and Forest Meteorology*, *124*, 81–97. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2003.06.001
21. Yilmaz, T. (2024). Understanding the influence of extreme cold on grapevine phenology in South Dakota's dormant season: Implications for sustainable viticulture. *Applied Fruit Science*, *66*, 1–8. https://doi.org/10.1007/s10341-024-01075-y. EDN: https://elibrary.ru/MTFEMU

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Рыбалко Евгений Александрович, канд. с.-х. наук, ведущий научный сотрудник, заведующий сектором агроэкологии
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Всероссийский национальный научно-исследовательский институт виноградарства и виноделия «Магарач» РАН»
ул. Кирова, 31, г. Ялта, 298600, Республика Крым, Российская Федерация
rybalko_ye_a@mail.ru

Баранова Наталья Валентиновна, канд. с.-х. наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник сектора агроэкологии
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Всероссийский национальный научно-исследовательский институт виноградарства и виноделия «Магарач» РАН»
ул. Кирова, 31, г. Ялта, 298600, Республика Крым, Российская Федерация
natali.v.0468@mail.ru

Ерхова Алина Сергеевна, младший научный сотрудник сектора агроэкологии
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Всероссийский национальный научно-исследовательский институт виноградарства и виноделия «Магарач» РАН»
ул. Кирова, 31, г. Ялта, 298600, Республика Крым, Российская Федерация
alina_meotida@mail.ru

DATA ABOUT THE AUTHORS

Evgeniy A. Rybalko, Cand. of Agric. Sci., Leading Staff Scientist, Head of the Agroecology Sector
All-Russian National Research Institute of Viticulture and Winemaking "Magarach" of RAS
31, Kirova Str., Yalta, 298600, Republic of Crimea, Russian Federation
rybalko_ye_a@mai.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4579-3505
Scopus Author ID: 57188725386

Natalia V. Baranova, Cand. of Agric. Sci., Senior Staff Scientist, Leading Staff Scientist, Agroecology Sector
All-Russian National Research Institute of Viticulture and Winemaking "Magarach" of RAS
31, Kirova Str., Yalta, 298600, Republic of Crimea, Russian Federation
natali.v.0468@mail.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2588-360X
Scopus Author ID: 57188716916

Alina S. Erkhova, Junior Staff Scientist, Agroecology Sector
All-Russian National Research Institute of Viticulture and Winemaking "Magarach" of RAS
31, Kirova Str., Yalta, 298600, Republic of Crimea, Russian Federation
alina_meotida@mail.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6920-471X

Поступила 31.01.2025 Received 31.01.2025
После рецензирования 14.04.2025 Revised 14.04.2025
Принята 20.04.2025 Accepted 20.04.2025

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-4-1214 **EDN: DSYDJQ**
УДК 57.04

CC BY NC ND

Научная статья

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ, ЗАСУХИ И ЗАКИСЛЕНИЯ ПОЧВЫ НА ЕЕ ИНДИКАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Е.В. Товстик, А.С. Олькова

Аннотация

Обоснование. Биотестовые и биоиндикационные показатели состояния почвы могут изменяться не только в результате загрязнения, но и в силу действия неблагоприятных факторов окружающей среды.

Целью исследования было сравнение влияния химического загрязнения, кратковременной засухи и закисления на токсикологические и биоиндикационные характеристики дерново-подзолистой почвы.

Методы исследования. Объектом исследования служили пробы дерново-подзолистой почвы, испытавшей независимое действие трех факторов: загрязнение кадмием (6,4±0,5 мг/кг), средний уровень кислотности (4,8 ед. pH), недостаток увлажнения (25 суток). При биотестировании использовали культуры *Parамecium caudatum* и препарат на основе *Escherichia coli*, при биоиндикации – каталазную и уреазную активность, численность основных эколого-трофических групп микроорганизмов в почве.

Результаты. Биотестирование водных вытяжек из почвы показало, что за 30 мин. тест-реакции индексы токсичности повышаются только в пробах со среднекислой реакцией среды; за 180 мин. экспозиции *E. coli* чувствительны к пробам почвы, испытавшей засуху и загрязнение кадмием, *P. caudatum* – только засуху. Уровень каталазной активности почвы при всех воздействиях был сопоставим с контролем (почва без воздействия); активность уреазы значимо снизилась только в почве со среднекислой реакцией среды. Численность аборигенных аммонификаторов в почве снижалась при всех видах воздействия; олиготрофы и олигокарбофилы – получали преимущество (относительно контроля).

Выводы. Природные экологические факторы могут изменять параметры экологического состояния почвы так же, как и антропогенные.

Ключевые слова: кадмий; кислотность почвы; засуха; реакции организмов; ферментативная активность; каталаза; уреаза; эколого-трофические группы; микроорганизмы; однофакторный анализ; корреляционный анализ

Для цитирования. Товстик, Е. В., & Олькова, А. С. (2025). Сравнительная оценка влияния загрязнения, засухи и закисления почвы на ее индикационные характеристики. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(4), 109-123. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-4-1214

Original article

COMPARATIVE ASSESSMENT OF THE IMPACT OF POLLUTION, DROUGHT AND ACIDIFICATION OF THE SOIL ON ITS INDICATIVE CHARACTERISTICS

E.V. Tovstik, A.S. Olkova

Abstract

Background. Toxicity and biological indicators of soil condition can change not only as a result of pollution, but also under the action of unfavorable environmental factors.

The aim of the study was to compare the effects of chemical pollution, short-term drought and acidification on the toxicological and bioindication characteristics of sod-podzolic soil**.**

Research methods. The object of the study was samples of sod-podzolic soil, which experienced the independent action of three factors: cadmium pollution (6.4±0.5 mg/kg), average acidity level (pH 4.8), lack of moisture (25 days). During bioassay, *Paramecium caudatum* cultures and a preparation based on *Escherichia coli* were used, during bioindication, catalase and urease activity, the number of the main ecological and trophic groups of microorganisms in the soil were used.

Results. Bioassay of water extracts from the soil showed that in 30 min test reactions, the toxicity indices increase only in samples with a medium acid reaction of the medium. *E. coli* in 180 minutes showed sensitivity to soil samples that had experienced drought and cadmium pollution, *P. caudatum* – only to drought. The level of catalase activity of the soil under all influences was comparable to the control (soil without exposure); urease activity significantly decreased only in soil with a medium acidic reaction of the medium. The number of native ammonifiers

in the soil decreased with all types of exposure; oligotrophes and oligocarbophiles gained an advantage (relative to control).

Conclusion. Thus, natural environmental factors can change the parameters of the ecological state of the soil in the same way as anthropogenic factors.

Keywords: cadmium; soil acidity; drought; reactions of organisms; enzymatic activity; catalase; urease; ecological and trophic groups; microorganisms; one-factor analysis; correlation analysis

For citation. Tovstik, E. V., & Olkova, A. S. (2025). Comparative assessment of the impact of pollution, drought and acidification of the soil on its indicative characteristics. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(4), 109-123. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-4-1214

Введение

Почва и её характеристики являются отражением совокупности экологических факторов: состава почвообразующей породы, климатических характеристик местности, растительного покрова, способа обработки [13]. Интерпретация результатов биотестирования и биоиндикации почв всегда должна проходить с учётом основных действующих факторов среды.

Типология почвы, особенности её генезиса и текущие физико-химические особенности в первую очередь влияют на её устойчивость к неблагоприятным факторам как природного, так и антропогенного происхождения. Известно, что почвы легкого гранулометрического состава являются более слабым геохимическим барьером при загрязнении по сравнению с почвами, содержащими больше глинистой фракции [1]. Высокая обеспеченность почвы органическим веществом способствует снижению подвижности многих поллютантов, в том числе тяжелых металлов [19]. Разнообразие типов почв приводит к тому, что один и тот же уровень загрязнения в разной степени оказывает влияние на её токсичность и биоиндикационные характеристики. Помимо загрязнения, почва может испытывать воздействие и других неблагоприятных факторов. Например, снижение среднегодовой температуры при прочих равных условиях, замедляет процессы жизнедеятельности почвенных организмов, что в свою очередь ведет к замедлению скорости минерализации органического вещества, сорбции токсикантов неорганической природы и биологической деструкции органических загрязнителей [3]. Содержание влаги в почве во время засухи или при повышении температуры в значительной степени контролируется водоудерживающей способностью почвы, которая увеличивается с уменьшением размера пор (пустот) между почвенными части-

цами [14]. В связи с этим песчаные и супесчаные почвы более устойчивы к летней засухе, чем суглинистые и глинистые.

Установлено, что активность экзоферментов почвы южной тайги и смешанных лесов больше всего зависит от среднегодовой температуры и уровня pH, а зависимости между активностью ферментов и содержанием органического вещества не прослеживается [18]. Изменение родового и видового разнообразия актиномицетов, степени минерализации органического вещества отмечается в почвах, заселяемых инвазивной растительностью [10].

То есть природные экологические факторы, как и антропогенные, могут влиять на индикационные характеристики почвы, используемые для заключения об экологическом состоянии почвенного покрова на территории исследования.

Сравнительная оценка воздействия на почву загрязнения и других экологических факторов – вопрос слабо изученный. Исходя из этого, *целью работы* было сравнение влияния химического загрязнения, кратковременной засухи и закисления на токсикологические и биоиндикационные характеристики дерново-подзолистой почвы.

Материалы и методы исследования

Концепцией данной работы было выявление степени воздействия факторов разной этиологии (загрязнение, повышенная кислотность, засуха) на изолированные почвенные модели. Обособленная оценка воздействия каждого из экологических факторов была направлена на проверку гипотезы о том, что причиной изменения индикационных характеристик почвы может быть не только загрязнение. Работа дополняет результаты, представленные в работе [7], где более подробно анализируются вариации индикационных признаков почвы под влиянием созданной нагрузки. В представленной работе сделан акцент на вопросах факториальной экологии с выходом на практические рекомендации по выбору методов исследования состояния почвы в зависимости от факторов её формирования и текущих антропогенных воздействий.

Объектом исследования была дерново-подзолистая среднесуглинистая среденегумусная (1,9–2,5% по ГОСТ 26213-91) почва, обеспеченность подвижным фосфором и нитратным азотом низкая (20–50 и 1,1–1,7 мг/кг соответственно по ГОСТ 26207-91 и 26951-86), pH 6,5±0,1 (вытяжка 1 н. раствор KCl по ГОСТ 26423-85) и 4,8±0,1 для варианта с повышенной кислотностью.

Моделирование действия разных факторов на почву проводилось в изолированных ёмкостях, размещенных на открытой площадке в естественных условиях вегетационного сезона (90 суток) среднетаежной подзоны. Модельное загрязнение почвы кадмием осуществлялось путем внесения в нее ацетата кадмия. Содержание подвижных соединений кадмия, извлекаемых из почвы ацетатно-аммонийным буфером, по данным атомно-абсорбционной спектрометрии составило при этом 6,4±0,5 мг/кг, что соответствует 3,2 кратности превышения ориентировочно допустимой концентрации (ОДК).

Действие фактора повышенной кислотности оценивалось в варианте со среднекислой природной почвой (pH_{KCl}=4,8±0,1), которая по другим физическим и физико-химическим характеристикам была близка к почве контрольного варианта (pH 6,5). Уровень pH почвы определяли в солевой вытяжке из почв согласно ГОСТ 26483-85 с помощью pH-метра марки pH-МИ150 (Россия).

Кратковременная засуха создавалась изоляцией емкости с почвой полимерным навесом на 25 суток.

Контрольный вариант не повергался воздействию.

Для анализа почву сушили до постоянной массы, пропускали через сито с диаметром отверстий 1 мм. Предметом исследования в пробах почвы служили интегральные показатели экологического состояния почвы.

Токсичность почвы оценивали по ответным реакциям *Paramecium caudatum* (Биотестер, Россия) [11] и бактериального препарата на основе *Escherichia coli* (Биотокс-10М, Россия) [8]. Тест реакцией *P. caudatum* было изменение хемотаксиса организмов, препарата *E. coli* – биолюминесценции бактериальной суспензии. Вычисляли индекс токсичности почвы по формуле: Т = (Тпр –Тк)/Тпр, где Т – индекс токсичности, Тпр – средние показания прибора для пробы, Тк – средние показания приборы для контроля (10% среда Лозина-Лозинского для теста по *P. caudatum*, дистиллированная вода для теста по *E. coli*). Оба теста проводили с экспозицией 30 минут, а также с увеличением времени контакта тест-организмов с вытяжками до 180 минут.

Активность каталазы в почве определяли газометрическим методом с оценкой объема кислорода, выделившегося за минуту ($см^3$ O_2/г мин). Активность уреазы определяли спектрофотометрическим методом на спектрофотометре марки ПЭ 5300ВИ (ООО «Экросхим», Россия) с расчетом количества расщепившейся мочевины (мг $N\text{-}NH_4^+$/г) [12]. Численность основных эколого-трофических групп микроорганизмов (КОЕ/г почвы)

оценивали на селективных питательных средах методом прямого подсчета колоний.

Статистический анализ был выполнен с использованием дисперсионного анализа (ANOVA) с последующим защищенным тестом наименьшей значимой разницы Фишера (критерий LSD). Оценку влияние каждого фактора на индикационные показатели почвы проводили по отдельности. Данные представляли в виде средних значений ± стандартные отклонения (n = 3). Разными буквенными индексами указывали достоверные отличия массивов данных (при $p < 0,05$).

Результаты

Индикационные показатели почвы при действии разных факторов

Дисперсионный анализ данных позволил провести сравнительную оценку влияния факторов разной этиологии на экотоксикологические, биохимические и биоиндикационные показатели почвы (табл. 1).

Таблица 1.

Токсикологические и биоиндикационные показатели дерново-подзолистой почвы, испытавшей воздействие разной этиологии

Показатель	Контроль	Кадмий	Кислотность	Засуха
Токсичность почвы при контакте 30 мин				
P. caudatum	0,55±0,015 [a]	0,62±0,06 [a]	0,75±0,03 [b]	0,62±0,09 [a]
E. coli	-118±17 [a]	-138,9±21,7 [a]	-67,4±21,5 [b]	-121,5±22,4 [a]
Токсичность почвы при контакте 180 мин				
P. caudatum	0,55±0,012 [a]	0,57±0,02 [a]	0,57±0,01 [a]	0,68±0,09 [b]
E. coli	6,6±2,0 [b]	78,90±11,06 [c]	-133±69 [a]	51,6±20,4 [b,c]
Ферментативная активность почвы				
Каталаза, см^{3}O$_2$/ г·-мин	1,10±0,29 [a]	0,96±0,014 [a]	0,80±0,11 [a]	0,90±0,12 [a]
Уреаза, мг N-NH$_4^+$/ г	26,1±2,1 [b]	29,9±2,4 [b]	15,9±1,3 [a]	30,0±2,4 [b]
Численность аборигенной микрофлоры, ×10^5 КОЕ / г				
Аммонификаторы	75±8 [d]	25,0±2,5 [b]	14,0±1,4 [a]	32,0±3,2 [c]
Амилолитики	50±5 [a]	320±32 [c]	310±31 [c]	80±8 [b]
Целлюлозолитики	5,0±0,5 [b]	7,0±0,7 [c]	2,00±0,20 [a]	3,00±0,30 [a]
Олиготрофы	3,00±0,30 [a]	12,0±1,20 [b]	8,3±0,8 [b]	66±7 [c]
Оликарбофилы	6,0±0,6 [a]	78±8 [d]	17,0±1,7 [c]	10,0±1,0 [b]

Примечание: результаты представлены в виде M±δ, где M – среднее значение опытных показателей (n=3), δ – стандартное отклонение; разноименные буквенные индексы указывают на достоверные различия в ряду сравнений «контроль-кадмий-кислотность-засуха» по одному показателю.

Тест по хемотаксису *P. caudatum* за 30 минут показал, что токсичность среднекислой почвы выше, чем в контроле в 1,4 раза, с кадмием и при засухе в 1,2 раза ($p < 0,05$). Почва, испытавшая воздействие кадмия и засухи, характеризовалась повышенными значениями индексов токсичности по сравнению с контролем, но достоверный уровень отличий не был достигнут ($p > 0,05$). За увеличенное время экспозиции проявилась токсичность почвы, подвергшейся засухе ($p<0,05$), разница с контролем составила 1,2 раза.

Особенностью реакции бактериальной тест-системы оказалась стимуляция биолюминесценции во всех пробах, однако, этот эффект был минимален в среднекислой почве. В данном случае реакцию можно считать снижением биолюминесценции бактериальной суспензии по сравнению с контролем (в 1,8 раз, $p<0,05$). При увеличении экспозиции до 180 минут реакция *E. coli* кардинально менялась. Контрольная почва оставалась нетоксичной: индекс Т имел положительное значение, но относился к I группе токсичности (не токсично). Действие вариантов «кадмий» и «засуха» становилось значительным: индексы Т достоверно отличались от контроля и характеризовали пробы как сильно токсичные. При этом реакция *E. coli* на вытяжку из среднекислой почвы оставалась в зоне стимуляции биолюминесценции, то есть данная проба по сравнению с другими вариантами была нетоксична.

Каталазная активность в почве значимо не менялась ни при одном из оцениваемых воздействий ($p>0,05$ при сравнении с контролем), однако тенденция к снижению значений показателя наблюдалась во всех вариантах. Максимальное снижение при этом регистрировали в среднекислой почве (в 1,4 раза по сравнению с контролем). Аналогично каталазной активности, уровень уреазы значительно снижался в среднекислой почве: в 1,6 раз по сравнению с контрольными значениями ($p<0,05$). Химический стресс и засуха не угнетали активность уреазы в почве.

Представители аборигенной микрофлоры опытной почвы в силу разной трофической принадлежности реагировали на оцениваемые факторы более разнообразно. Численность аммонификаторов и целлюлозолитиков максимально снижалась в среднекислой почве (в 5,4 и 2,5 раза по сравнению с контролем). Амилолитики, амилокарбофилы и олиготрофы присутствовали в составе сообщества контрольной почвы в качестве минорного компонента, а в опытных вариантах их численность повышалась. Представители этих же групп микроорганизмов были обнаружены в наибольшей численности в варианте «кадмий», кроме олиготрофов, которые получили численное преимущество при засухе.

Обсуждение результатов

В совокупности результаты показали, что загрязнение почвы кадмием на уровне 3,2 ОДК является не критичным воздействием, значимо не меняющим острую токсичность почвы по биотестам, которые, согласно предыдущим исследованиям, были отнесены к чувствительным по отношению к тяжелым металлам [6]. При этом средний уровень кислотности почвы (4,8 ед. pH) и кратковременная засуха (25 дней) повлияли на интегральную токсичность. Это говорит о том, что неблагоприятные природные факторы могут не только напрямую влиять на продуктивность экосистем, в том числе агроэкосистем [4, 9], но и косвенно – через изменение свойств почвы.

Выявлено, что время контакта тест-организмов с тестируемой средой является крайне важным фактором, влияющим на заключение о токсичности проб почвы. В исследовании [17] показано, что не только состав загрязнения, но и продолжительность воздействия на тест-организмы влияют на результаты исследований. В наших экспериментах токсичность экзогенного кадмия для *E. coli* стала очевидной только через 3 часа экспозиции. Для улучшения прогнозов о токсичности веществ необходимы подробные лабораторные исследования продолжительностью не менее 24 часов [16]. Отметим, что экспресс-биотесты позволяют отслеживать динамику развития токсического процесса за относительно короткие промежутки времени, что необходимо внедрять в природоохранную практику для вынесения объективного заключения о токсичности пробы.

Активность каталазы почвы оказалась не чувствительна к загрязнению кадмием, увеличению кислотности почвы и засухе. Вероятно, это связано с тем, что уровень испытуемой нагрузки не являлся экстремальным. Так, в работе [5] показано, что изменение активности каталазы при загрязнении почвы кадмием на уровне 5 и 10 мг/кг, было менее значимым, чем при 20 и 40 мг/кг. При этом отмечали снижение активности уреазы – только в варианте со слабокислой почвой. Это также подтверждает, что уровень моделируемого загрязнения кадмием не являлся экстремальным, а также, что кислотность почвы – важный фактор, влияющий не только на доступность питательных веществ для растений [20], но и на индикационные параметры почвы.

Реакцию аборигенной микрофлоры, а именно повышение численности колоний амилолитиков, амилокарбофилов и олиготрофов, можно отнести к начальной стадии их стресса [2], что наблюдалось при всех трех видах воздействия на почву. При уменьшении влажности снижается интенсивность естественного гидролиза питательных веществ, что ограничило раз-

множение многих групп микробов, кроме неприхотливых олиготрофов. Стимуляция аборигенных почвенных микроорганизмов относительно невысоким химическим воздействием отмечается многими исследователями [15; 21], что мы и наблюдали в наших экспериментах.

Таким образом, подтвердилась недооцененная роль фактора почвенного увлажнения и уровня pH в формировании структуры почвенных сообществ, о чем сообщалось ранее [17]. Новизной нашей работы является демонстрация экотоксикологических и биохимических откликов почвы на неблагоприятные факторы физической и физико-химической природы.

Результаты выполненного анализа позволили составить ряд информативности показателей экологического состояния почвы в условиях исследуемых абиотических факторов: численность аборигенной микрофлоры > биотесты ≥ ферментативная активность почвы.

Заключение

Результаты работы показали, что экологические факторы разной этиологии могут одинаково влиять на показатели почвы, которые используются для оценки ее экологического состояния.

В результате сравнения действия на почву загрязнения кадмием, повышенной кислотности и кратковременной засухи оказалось, что при экспресс-биотестировании (30 мин.) только фактор кислотности увеличивал токсичность почвы. Более длительный контакт тест-организмов с почвенными вытяжками привел к регистрации токсичности в загрязненной почве (*E. coli*) и в почве, испытавшей засуху (*P. caudatum* и *E. coli*).

Действие повышенной кислотности оказалось значимым для уреазной активности почвы, активность каталазы была стабильной.

Все факторы влияли на численность аборигенной микрофлоры в соответствии с трофическими предпочтениями групп. Так, численность аммонификаторов и олиготрофов снижалась в ряду «засуха-загрязнение-кислотность». Кислотность и засуха угнетали целлюлозолитиков на одинаковом уровне. Развитие аммилолитиков и олиготрофов одинаково стимулировалось действием кадмия и кислой реакции среды, а стимуляция олигокарбофилов возрастала в ряду «засуха-кислотность-загрязнение».

Выполненный анализ позволил рекомендовать индикаторные показатели для оценки состояния почвы в разных условиях. К загрязнению кадмием оказались наиболее чувствительны биотест по *E. coli* (180 мин.) и биоиндикация по амилолитической микрофлоре. О повышенной кислотности будут свидетельствовать результаты биотестов по *P. caudatum* и *E.*

coli (30 мин.), биоидикация по целлюлозолитикам и уреазной активности почвы. В засушливой почве следует ожидать увеличения токсичности по *P. caudatum* и *E. coli* (180 мин.) и снижения численности целлюлозолитиков.

Каждый фактор был представлен одним уровнем воздействия, что влечет за собой ограничения в применении сформулированных рекомендаций и выводов. Однако, исследованные уровни загрязнения, кислотности и действия засухи являются распространенными.

Список литературы

1. Воронина, Л. П., Поногайбо, К. Э., & Савостикова, О. Н. (2022). Обоснование выбора типов почв для гигиенического нормирования химических веществ (обзор литературы). *Гигиена и санитария*, *101*(3), 270–274. https://doi.org/10.47470/0016-9900-2022-101-3-270-274. EDN: https://elibrary.ru/JNUISW
2. Добровольская, Т. Г., Звягинцев, Д. Г., Чернов, И. Ю., Головченко, А. В., Зенова, Г. М., Лысак, Л. В., Манучарова, Н. А., Марфенина, О. Е., Полянская, Л. М., Степанов, А. Л., Умаров, М. М. (2015). Роль микроорганизмов в экологических функциях почв. *Почвоведение*, *9*, 1087–1096. https://doi.org/10.7868/S0032180X15090038. EDN: https://elibrary.ru/UDEUQV
3. Добровольский, Г. В., Куст, Г. С., Чернов, И. Ю., Добровольская, Т. Г., Лысак, Л. В., Андреева, О. В., Степанов, А. Л., Ковалева, Н. О., Макеев, А. О., Федотов, Г. Н., Шалаев, В. С., Соколов, М. С., Розов, С. Ю., Смагин, А. В., Ковалев, И. В., Медведева, О. Е., Бессонова, Е. А., Попова, Л. В., Рыхликова, М. Е., Рахлеева, А. А., Мартыненко, И. А. (2012). *Почвы в биосфере и жизни человека* (584 с.). Москва: Московский государственный университет леса (Мытищи). ISBN: 978-5-8135-0575-1. EDN: https://elibrary.ru/TNBORZ
4. Кедрова, Л. И., & Уткина, Е. И. (2018). Влияние почвенной кислотности на урожайность озимой ржи и возможности эдафической выборки. *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*, *6*(67), 17–25. https://doi.org/10.30766/2072-9081.2 Newton.67.6.17-25. EDN: https://elibrary.ru/VNWGUZ
5. Новосёлова, Е. И., & Волкова, О. О. (2017). Влияние тяжёлых металлов на активность каталазы разных типов почв. *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*, *2*(64), 190–193. EDN: https://elibrary.ru/YMXHIZ
6. Олькова, А. С., & Ашихмина, Т. Я. (2021). Факторы получения репрезентативных результатов биотестирования водных сред (обзор). *Теоретическая и прикладная экология*, *2*, 22–30. https://doi.org/10.25750/1995-4301-2021-2-022-030. EDN: https://elibrary.ru/ANOOJP

7. Олькова, А. С., & Товстик, Е. В. (2024). Информативность показателей экологического состояния почвы, находящейся в условиях низкоуровневого стресса: загрязнение, засуха, кислотность. *Трансформация экосистем*, *7*(3), 138–152. https://doi.org/10.23859/estr-230217. EDN: https://elibrary.ru/NMVRYS
8. ПНД Ф Т 14.1:2:3:4.11-04. *Методика определения интегральной токсичности поверхностных, в том числе морских, грунтовых, питьевых, сточных вод, водных экстрактов почв, отходов, осадков сточных вод по изменению бактериальной биолюминесценции тест-системой «Эколюм»* [Документ]. Министерство природных ресурсов РФ, Москва, 2004 (издание 2010 г.).
9. Страшная, А. И., Бирман, Б. А., & Береза, О. В. (2018). Особенности засухи 2012 г. на Урале и в западной Сибири и её влияние на урожайность яровых зерновых культур. *Гидрометеорологические исследования и прогнозы*, *2*(368), 154–169. EDN: https://elibrary.ru/UTCDQO
10. Товстик, Е. В., Широких, И. Г., Соловьёва, Е. С., Широких, А. А., Ашихмина, Т. Я., & Савиных, В. П. (2018). Изменение почвенной актинобиоты под влиянием инвазии борщевика Сосновского. *Теоретическая и прикладная экология*, *4*, 114–118. https://doi.org/10.25750/1995-4301-2018-4-114-118. EDN: https://elibrary.ru/YXSUIX
11. ФР. 1.39.2015.19243. *Методика определения токсичности проб почв и донных отложений экспресс-методом с применением прибора серии «Биотестер»* (16 с.). Санкт-Петербург: ООО «СПЕКТР-М», 2015.
12. Хазиев, Ф. Х. (2005). *Методы почвенной энзимологии* (252 с.). Москва: Наука. ISBN: 5-02-033940-7. EDN: https://elibrary.ru/QKXHYJ
13. Dixon, J. C. (2015). Soil morphology in the critical zone: The role of climate, geology, and vegetation in soil formation in the critical zone. *Developments in Earth Surface Processes*, *19*, 147–172. https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63369-9.00005-7
14. Dong, J., & Ochsner, T. E. (2018). Soil texture often exerts a stronger influence than precipitation on mesoscale soil moisture patterns. *Water Resources Research*, *54*(3), 2199–2211. https://doi.org/10.1002/2017WR021692
15. Fan, D., Wang, S., Guo, Y., Liu, J., Agathokleous, E., Zhu, Y., & Han, J. (2021). The role of bacterial communities in shaping Cd-induced hormesis in ‘living’ soil as a function of land-use change. *Journal of Hazardous Materials*, *409*, 124996. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124996. EDN: https://elibrary.ru/JLHKTZ
16. French-McCay, D. P., Robinson, H. J., Adams, J. E., Frediani, M. A., Murphy, M. J., Morse, Ch., Gloekler, M., & Parkerton, Th. F. (2024). Parsing the toxicity

paradox: Composition and duration of exposure alter predicted oil spill effects by orders of magnitude. *Marine Pollution Bulletin*, *202*, 116285. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.116285. EDN: https://elibrary.ru/FOAAFE

17. Howe, J. A., & Peyton, S. A. (2021). The soil habitat. In T. J. Gentry, J. J. Fuhrmann, & D. A. Zuberer (Eds.), *Principles and Applications of Soil Microbiology* (3rd ed., pp. 23–55). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820202-9.00002-2
18. Olkova, A. S., & Tovstik, E. V. (2022). Comparison of natural abiotic factors and pollution influence on the soil enzymatic activity. *Ecological Engineering & Environmental Technology*, *23*(1), 42–48. https://doi.org/10.12912/27197050/143003. EDN: https://elibrary.ru/MKSPWQ
19. Sohail, M. I., Arif, M., Rauf, A., Rizwan, M., Ali, S., Saqib, M., & Zia-ur-Rehman, M. (2019). Chapter 2: Organic manures for cadmium tolerance and remediation. In: *Cadmium Tolerance in Plants* (pp. 19–67). https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815794-7.00002-3. EDN: https://elibrary.ru/YXETYY
20. Sparks, D. L., Singh, B., & Siebecker, M. G. (2024). Chapter 9: The chemistry of soil acidity. In: *Environmental Soil Chemistry* (3rd ed., pp. 381–410). Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-443-14034-1.00009-5
21. Zhang, Y., Yang, S., Yang, J., Wu, Z., Liu, H., Nie, Z., Qu, J., Hu, Y., Shao, Y., Liu, J., Liu, F., & Hua, D. (2023). Temporal hormetic response of soil microbes to cadmium: A metagenomic perspective. *Science of the Total Environment*, *891*, 164190. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164190. EDN: https://elibrary.ru/ZBCKIQ

References

1. Voronina, L. P., Pongaybo, K. E., & Savostikova, O. N. (2022). Rationale for selecting soil types for hygienic standardization of chemicals (literature review). *Hygiene and Sanitation*, *101*(3), 270–274. https://doi.org/10.47470/0016-9900-2022-101-3-270-274. EDN: https://elibrary.ru/JNUISW
2. Dobrovolskaya, T. G., Zvyagintsev, D. G., Chernov, I. Yu., Golovchenko, A. V., Zenova, G. M., Lysak, L. V., Manucharova, N. A., Marfenina, O. E., Polyanskaya, L. M., Stepanov, A. L., & Umarov, M. M. (2015). Role of microorganisms in ecological functions of soils. *Eurasian Soil Science*, *9*, 1087–1096. https://doi.org/10.7868/S0032180X15090038. EDN: https://elibrary.ru/UDEUQV
3. Dobrovolsky, G. V., Kust, G. S., Chernov, I. Yu., Dobrovolskaya, T. G., Lysak, L. V., Andreeva, O. V., Stepanov, A. L., Kovaleva, N. O., Makeev, A. O., Fedotov, G. N., Shalaev, V. S., Sokolov, M. S., Rozov, S. Yu., Smagin, A. V., Kovalev, I. V., Medvedeva, O. E., Bessonova, E. A., Popova, L. V., Rykhlikova, M. E., Rakhleeva, A. A., & Martynenko, I. A. (2012). *Soils in the biosphere and*

human life (584 pp.). Moscow: Moscow State Forest University (Mytishchi). ISBN: 978-5-8135-0575-1. EDN: https://elibrary.ru/TNBORZ

4. Kedrova, L. I., & Utkina, E. I. (2018). Effect of soil acidity on winter rye yield and possibilities of edaphic selection. *Agricultural Science of the Euro-North-East*, *6*(67), 17–25. https://doi.org/10.30766/2072-9081.2 Newton.67.6.17-25. EDN: https://elibrary.ru/VNWGUZ
5. Novoselova, E. I., & Volkova, O. O. (2017). Effect of heavy metals on catalase activity in different soil types. *Proceedings of Orenburg State Agrarian University*, *2*(64), 190–193. EDN: https://elibrary.ru/YMXHIZ
6. Olkova, A. S., & Ashikhmina, T. Ya. (2021). Factors for obtaining representative results in biotesting of aquatic environments (review). *Theoretical and Applied Ecology*, *2*, 22–30. https://doi.org/10.25750/1995-4301-2021-2-022-030. EDN: https://elibrary.ru/ANOOJP
7. Olkova, A. S., & Tovstik, E. V. (2024). Information value of indicators of soil ecological state under low-level stress conditions: pollution, drought, acidity. *Ecosystem Transformation*, *7*(3), 138–152. https://doi.org/10.23859/estr-230217. EDN: https://elibrary.ru/NMVRYS
8. PND F T 14.1:2:3:4.11-04. *Method for determining integral toxicity of surface waters (including marine), groundwater, drinking water, wastewater, aqueous extracts of soils, waste, sewage sludge by changes in bacterial bioluminescence using the "Ecolum" test system* [Document]. Ministry of Natural Resources of the Russian Federation, Moscow, 2004 (2010 edition).
9. Strashnaya, A. I., Birman, B. A., & Bereza, O. V. (2018). Features of the 2012 drought in the Urals and Western Siberia and its impact on spring grain crop yields. *Hydrometeorological Research and Forecasting*, *2*(368), 154–169. EDN: https://elibrary.ru/UTCDQO
10. Tovstik, E. V., Shirokikh, I. G., Solovyova, E. S., Shirokikh, A. A., Ashikhmina, T. Ya., & Savinykh, V. P. (2018). Changes in soil actinobiotics under the influence of Heracleum sosnowskyi invasion. *Theoretical and Applied Ecology*, *4*, 114–118. https://doi.org/10.25750/1995-4301-2018-4-114-118. EDN: https://elibrary.ru/YXSUIX
11. FR. 1.39.2015.19243. *Method for determining toxicity of soil and bottom sediment samples using the express method with the "Biotester" series device* (16 pp.). Saint Petersburg: LLC "SPEKTR M", 2015.
12. Khaziev, F. Kh. (2005). *Methods of soil enzymology* (252 pp.). Moscow: Nauka. ISBN: 5-02-033940-7. EDN: https://elibrary.ru/QKXHYJ
13. Dixon, J. C. (2015). Soil morphology in the critical zone: The role of climate, geology, and vegetation in soil formation in the critical zone. *Developments*

in Earth Surface Processes, *19*, 147–172. https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63369-9.00005-7

14. Dong, J., & Ochsner, T. E. (2018). Soil texture often exerts a stronger influence than precipitation on mesoscale soil moisture patterns. *Water Resources Research*, *54*(3), 2199–2211. https://doi.org/10.1002/2017WR021692
15. Fan, D., Wang, S., Guo, Y., Liu, J., Agathokleous, E., Zhu, Y., & Han, J. (2021). The role of bacterial communities in shaping Cd-induced hormesis in 'living' soil as a function of land-use change. *Journal of Hazardous Materials*, *409*, 124996. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124996. EDN: https://elibrary.ru/JLHKTZ
16. French-McCay, D. P., Robinson, H. J., Adams, J. E., Frediani, M. A., Murphy, M. J., Morse, Ch., Gloekler, M., & Parkerton, Th. F. (2024). Parsing the toxicity paradox: Composition and duration of exposure alter predicted oil spill effects by orders of magnitude. *Marine Pollution Bulletin*, *202*, 116285. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.116285. EDN: https://elibrary.ru/FOAAFE
17. Howe, J. A., & Peyton, S. A. (2021). The soil habitat. In T. J. Gentry, J. J. Fuhrmann, & D. A. Zuberer (Eds.), *Principles and Applications of Soil Microbiology* (3rd ed., pp. 23–55). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820202-9.00002-2
18. Olkova, A. S., & Tovstik, E. V. (2022). Comparison of natural abiotic factors and pollution influence on the soil enzymatic activity. *Ecological Engineering & Environmental Technology*, *23*(1), 42–48. https://doi.org/10.12912/27197050/143003. EDN: https://elibrary.ru/MKSPWQ
19. Sohail, M. I., Arif, M., Rauf, A., Rizwan, M., Ali, S., Saqib, M., & Zia-ur-Rehman, M. (2019). Chapter 2: Organic manures for cadmium tolerance and remediation. In: *Cadmium Tolerance in Plants* (pp. 19–67). https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815794-7.00002-3. EDN: https://elibrary.ru/YXETYY
20. Sparks, D. L., Singh, B., & Siebecker, M. G. (2024). Chapter 9: The chemistry of soil acidity. In: *Environmental Soil Chemistry* (3rd ed., pp. 381–410). Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-443-14034-1.00009-5
21. Zhang, Y., Yang, S., Yang, J., Wu, Z., Liu, H., Nie, Z., Qu, J., Hu, Y., Shao, Y., Liu, J., Liu, F., & Hua, D. (2023). Temporal hormetic response of soil microbes to cadmium: A metagenomic perspective. *Science of the Total Environment*, *891*, 164190. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164190. EDN: https://elibrary.ru/ZBCKIQ

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Товстик Евгения Владимировна, канд. биол. наук, доцент, доцент, с.н.с. кафедры фундаментальной химии и методики обучения химии

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Вятский государственный университет»
ул. Московская, 36, г. Киров, 610000, Российская Федерация
tovstik2006@inbox.ru

Олькова Анна Сергеевна, докт. биол. наук, доцент, профессор, с.н.с. кафедры экологии и природопользования
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Вятский государственный университет»
ул. Московская, 36, г. Киров, 610000, Российская Федерация
usr08617@vyatsu.ru

DATA ABOUT THE AUTHORS

Evgeniya V. Tovstik, Candidate of Biological Sciences, Docent, Senior Researcher, Associate Professor of the Department of Fundamental Chemistry and Methods of Teaching Chemistry
Vyatka State University
36, Moskovskaya Str., 610000, Kirov, Russian Federation
tovstik2006@inbox.ru
SPIN-code: 8792-9281
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1861-6076
ResearcherID: ID P-1350-2017
Scopus Author ID: 57004932100

Anna S. Olkova, Doctor of Biological Sciences, Docent, Professor and Senior Research Fellow of the Department of Ecology and Environmental Management
Vyatka State University
36, Moskovskaya Str., 610000, Kirov, Russian Federation
usr08617@vyatsu.ru
SPIN-code: 4874-9240
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5798-8211
Researcher ID: A-4963-2017
Scopus Author ID: 57195523346

Поступила 08.11.2024 Received 08.11.2024
После рецензирования 20.12.2024 Revised 20.12.2024
Принята 27.12.2024 Accepted 27.12.2024

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-4-1199 **EDN: IQFJHQ**
УДК 631.6:633.11

CC BY NC ND

Научная статья

РОЛЬ АГРОЛЕСОМЕЛИОРАТИВНЫХ СИСТЕМ В ФОРМИРОВАНИИ УРОЖАЙНОСТИ *TRITICUM AESTIVUM* (РЕГИОНАЛЬНЫЙ УРОВЕНЬ)

А.М. Пугачёва

Аннотация

Обоснование. Несмотря на доказанный факт влияния лесомелиоративных систем на повышение урожайности отдельных сельскохозяйственных культур на конкретных объектах исследований, открытым остается вопрос достоверности участия фактора лесистости в урожайности, среди множества иных факторов влияния. В работе впервые представлены результаты исследований по влиянию комплекса факторов: лесистости объектов исследований (районов Волгоградской области) в виде площадей защитных лесных насаждений (ЗЛН), почвенного плодородия (гумус) и осадков на урожайность озимой пшеницы, основной зерновой культуры засушливых территорий.

Материалы и методы исследования. Оптимальный показатель лесистости земель сельскохозяйственного назначения, принятый в исследовании, составляет 1.5%. Применена методика расчета лесистости территорий земель относящихся к иным категориям. По объектам исследований построены и проанализированы длительные временные ряды (50 лет) урожайности озимой пшеницы и осадков. Методология проведения статистического анализа включает множественную регрессию, анализ коэффициентов парной, частной и множественной корреляции, а также их надежность и значимость.

Результаты. Данными за период с 1973 по 2022 гг. подтверждены зональные различия в урожайности изучаемой сельскохозяйственной культуры, что доказывает неизменное влияние почвенно-климатических условий на сельскохозяйственное производство в изменяющихся условиях климата. Выявлена достоверная корреляционная зависимость средней степени между урожайностью и площадями ЗЛН – 0.51, подтвержденная t критерием 1.86 при α 0.10. Сильная связь выявлена между урожайностью и почвенным плодородием (гумус) и урожайностью и количеством осадков – 0.85; 0.86. t критерий – 5.1 при

α 0.01 (0.99). Расчет влияния комплекса факторов на показатели урожайности проведен методом множественной регрессии. Полученный в регрессионной модели коэффициент детерминации R^2=0.824 свидетельствует, что 82.4% вариаций в урожайности объясняются исследуемыми факторами. Остальные проценты приходятся на неучтенные факторы. Полученные p-значения изучаемых факторов - почвенного плодородия (гумус) 0.18 и осадков 0.40, являются статистически значимыми при уровне значимости α 0.10.

Заключение. Данное исследование свидетельствует о наличии достоверного вклада ЗЛН в продуктивность земель сельскохозяйственного назначения, представленную урожайностью озимой пшеницы. Подтверждается необходимость создания искусственных насаждений на землях сельскохозяйственного назначения и доведения их площадей до оптимальных значений, с целью более эффективного функционирования земель сельскохозяйственного назначения.

Ключевые слова: агролесомелиоративные системы; защитные лесные насаждения; лесистость; урожайность; озимая пшеница; почвенное плодородие; гумус; осадки

Для цитирования. Пугачёва, А. М. (2025). Роль агролесомелиоративных систем в формировании урожайности *Triticum aestivum* (региональный уровень). *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(4), 124-154. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-4-1199

Original article

THE ROLE OF AGROFORESTRY SYSTEMS IN THE PRODUCTION OF *TRITICUM AESTIVUM* (REGIONAL LEVEL)

A.M. Pugacheva

Abstract

Background. Despite the proven effect of forest reclamation systems on increasing the yield of individual crops at specific research sites, the question of the reliability of the participation of the forest cover factor in yield, among many other influencing factors, remains open. The paper presents for the first time the results of research on the influence of a complex of factors: the forest cover of research facilities (districts of the Volgograd region) in the form of areas of protective forest plantations, soil fertility (humus) and precipitation on the yield of winter wheat, the main grain crop of arid territories.

Materials and methods. The optimal indicator of the forest cover of agricultural land, adopted in the study, is 1.5%. A methodology for calculating the forest cover of territories belonging to other categories has been applied. Long-term time series (50 years) have been constructed and analyzed for the objects of research winter wheat yields and precipitation. The methodology of statistical analysis includes multiple regression, analysis of the coefficients of paired, partial and multiple correlations, as well as their reliability and significance.

Results. Data for the period from 1973 to 2022 confirmed the zonal differences in the yield of the crop under study, which proves the constant influence of soil and climatic conditions on agricultural production in changing climate conditions. A reliable correlation of the average degree between the yield and the areas of protective forest plantations was revealed and it amounted to 0.51, It was confirmed by t-criterion of 1.86 at α 0.10. A strong connection was found between yield and soil fertility (humus), yield and rainfall – 0.85; 0.86. T- criterion amounted to 5.1 at α 0.01 (0.99). The impact of the complex of factors on yield indicators was calculated by multiple regression. The coefficient of determination $R^2 = 0.824$ obtained in the regression model indicates that 82.4% of variations in yield are explained by the studied factors. The remaining percentages are considered to be unaccounted factors. The obtained p-values of the studied factors as soil fertility (humus) of 0.18 and precipitation of 0.40 are statistically important at a significance level of α 0.10.

Conclusion. This study indicates that there is a significant contribution of grain to the productivity of agricultural land, represented by the yield of fall wheat. There is a need to create artificial plantations on agricultural lands and bring their areas to optimal forest cover indicators in order the agricultural industry to function more effectively.

Keywords: agroforestry systems; protective forest plantations; forest cover; yield; fall wheat; soil fertility; humus; precipitation

For citation. Pugacheva, A. M. (2025). The role of agroforestry systems in the production of *Triticum aestivum* (regional level). *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(4), 124-154. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-4-1199

Введение

Составной частью экологически сбалансированных ландшафтов, включая земли сельскохозяйственного назначения, является облесение территорий. Лесистость земель, выраженная в процентах, считается важным статистическим показателем и характеризует природные богатства Российской Федерации. Показатель лесистости выступает также показателем состояния современных агролесоландшафтов регионального уров-

ня [http://www.gks.ru]. По данным Макар С.В., устойчивое региональное развитие тесно связано с лесным потенциалом земель. Данный показатель является важной составляющей любого регионального пространства вне зависимости от показателя лесистости его территории [16]. По исследованиям Архиповой М.В. за длительный период с конца XIX до конца XX века на территории Среднерусской возвышенности наблюдается увеличение показателя лесистости в северной части и его уменьшение в южной [46].

Значимость показателя лесистость является общепризнанной и доказанной. Его необходимые процентные значения для устойчивого функционирования территорий в разных природных зонах и регионах до настоящего времени остаются вопросом дискуссионным. Каждый подход в определении оптимальных значений имеет свою индивидуальность и зависит от задач, стоящих в том числе перед аграрным сектором с целью достижения высокой продуктивности аграрного производства [17; 18]. С этим связана разница в единицах необходимых показателей лесистости. По мнению Молчанова А.А., в малолесных районах, где в настоящее время 70% площади занято полями и пастбищами, лесистость должна составлять 25-30% [17, с. 6]. В Стратегиях защитного лесоразведения Российской Федерации и Волгоградской области указан показатель оптимальной лесистости земель сельскохозяйственного назначения, составляющий 1,5% [41; 42]. В одной из исследовательских работ Тубалова А.А., с помощью применения метода картографического моделирования на примере Волгоградского региона данный показатель определен в 3% [58]. Несмотря на имеющиеся общие подходы агролесомелиоративного обустройства земель в Европейских странах и в Российской Федерации, имеются различия. Из схожих практик можно назвать прибрежные буферные полосы и противоэрозионные насаждения, которые в Российской Федерации считаются традиционными, продолжая успешно создаваться в настоящее время. Имеющиеся различия, например, касаются принадлежности агролесомелиоративных насаждений в России к землям сельскохозяйственного назначения. Применяемые в Европе практики лесоводства в лесных массивах к агролесомелиорации в России не относятся. Среди развивающихся европейских практик агролесомелиорации можно назвать так называемые аллейные насаждения, то есть чередующиеся на пашне древесные и сельскохозяйственные культуры [49; 59; 62]. Данные системы завоевывают в Европе все большие площади и имеет доказанный эффект повышения урожайности сельскохозяйственных культур. Максимальный эффект

проявляется до определенного возраста и высоты древесных насаждений [64]. Практика аллейных насаждений в Российской Федерации представлена в виде придорожных насаждений, оказывающих противоэрозионные функции. Системы агролесомелиорации в Европе имеют многовековую практику: *Dehesas* в Испании, *Montado* в Португалии, оливковые рощи, *Streuobst* (фруктовые сады), живые изгороди и буреломы [50; 54]. В связи с общей интенсификацией сельскохозяйственного производства, связанной с распашкой земель, старые практики постепенно исчезают [48; 53; 54; 63]. На их место приходят новые, предоставляющие возможности по числу экосистемных услуг с единицы площади (депонирование углерода, повышение плодородия, борьба с эрозией, восстановление биоразнообразия, борьба с опустыниванием и других) [15; 45; 52; 55; 61; 62; 65]. В Российской Федерации виды агролесомелиоративных практик остаются неизменными.

Доказанное влияние лесных насаждений на прилегающие территории, помимо множества положительных экологических (природных) эффектов: снижение скорости ветра, улучшение микроклимата на межполосных пространствах и других, оказывают влияние на увеличение урожайности сельскохозяйственных культур [1; 9; 22; 51; 14; 24; 31; 32]. В одной из опубликованных работ создание на землях сельскохозяйственного назначения завершенных агролесомелиоративных систем или комплексов, рассматривается как резервное направление развития отрасли растениеводства [25]. Доказанным фактом является то что положительное влияние на прилегающие территории оказывают агролесомелиоративные системы, а не отдельные полосы защитных насаждений. Эти насаждения размещаются по периметру сельскохозяйственных полей, либо в виде групп насаждений носящих локальный характер. При этом агролесомелиоративной наукой при изучении влияния насаждений на урожайность сельскохозяйственных культур рассматриваются преимущественно полезащитные насаждения [23]. О положительной роли полезащитных лесных полос на урожайность различных сельскохозяйственных культур в начале XX века указал Логгинов В.В. [20]. Изучая влияние полезащитных лесных полос на урожайность зерновых культур, он заявлял о повышении урожайности на 25%. Научные исследования современного периода по данному направлению являются фрагментарными, носят преимущественно региональный характер, представляя результаты исследований по изучению конкретных полей севооборотов, отдельных сельскохозяйственных культур и ряда физиологических по-

казателей. Из последних, можно выделить работы, в которых рассматривается влияние полезащитных лесных насаждений на урожайность и физиологические процессы целого ряда культур: подсолнечник, озимая и яровая пшеницы, кукуруза и другие [21; 27; 28; 29; 30; 32; 36; 37; 47]. Разработанные патенты, достоверно доказывают положительное влияние искусственных насаждений на этапы продукционного процесса и как следствие на урожайность в целом [40; 33; 35; 43]. Несмотря на доказанный факт влияния лесомелиоративных систем на повышение урожайности отдельных сельскохозяйственных культур на конкретных объектах исследований, открытым остается вопрос достоверности участия фактора лесистости в урожайности, среди множества иных факторов влияния. Новизна исследований заключается в комплексном подходе к оценке влияния ряда факторов на урожайность озимой пшеницы, а также в перечне самих факторов, одним из которых является лесистость территорий в виде имеющихся площадей искусственных насаждений.

Целью данной работы является определение достоверности вклада фактора лесистость в урожайность озимой пшеницы, основной продовольственной культуры засушливых регионов, на примере Волгоградской области. Задачами исследования являлось: определить за 50-ти летний период среднюю урожайность озимой пшеницы по районам Волгоградской области, определить среднюю урожайность по зонам, определить за 50-ти летний период показатель влагообеспеченности по районам области и по зонам, провести многофакторный анализ с выявлением общего вклада факторов лесистость, почвенное плодородие, влагообеспеченность в урожайность озимой пшеницы. Определить наличие или отсутствие достоверного вклада показателя лесистости территорий в урожайность озимой пшеницы.

Объекты и методика

Описание объектов исследований с представлением почвенно-климатических зон

Волгоградская область выбрана объектом исследований, так как она является аграрным регионом, представляет собой комплекс контрастных природных зон отличающихся индивидуальными характеристиками почв, климатических показателей, в нашем исследовании представленных осадками (табл. 1). В регионе выражена широтная зональность [38]. В данной работе зональное деление представлено по Овчинникову А.С. [19].

Таблица 1.

Почвенно-климатическая характеристика зон Волгоградской области

№ п/п	Зона	Тип почв	Содержание гумуса,*	S насаждений на пашне, тыс. га**	Осадки (ср. многолетняя)***
1.	Настоящая степь	черноземный	5.1	28 390.1	445
2.	Сухая степь	темно-каштановый	4.7	35 353.3	364
		каштановый	2.7		
3.	Полупустыня	светло-каштановый	3.5	5 728.1	329

Примечание: *- содержание гумуса представлено в горизонте A_1 (среднее A_1+A_{1a}) по данным Единого государственного реестра почвенных ресурсов России [ЕГРПР, https://egrpr.esoil.ru].

** - по данным инвентаризации 2015 года [34, 56]

*** - среднее за 50-летний период с 1973-2021 гг. [2]

Пространственная уникальность территории Волгоградской области заключается в специфичном гидротермическом режиме природной среды и сложных условиях почвообразования [39]. Это обусловило формирование на территории большого количества типов (15), подтипов и разновидностей (около 3000) почв [10]. Увеличение аридности и континентальности климата в юго-восточном направлении области объясняется проходящим по территории атмосферным фронтом, на стыке полярного и тропического воздуха. Погодно-климатическая изменчивость и контрастность проявляется во всех компонентах ландшафтов: растительности, почвенном покрове, степени его засоленности, типе водного режима почвогрунтов и даже глубине залегания грунтовых вод. Уникальность и контрастность также относится к геологии и рельефу исследуемого региона.

Существующие лесомелиоративные системы Волгоградской области

Расчеты площадей насаждений по районам области, их видам представлены по почвенно-климатическим зонам – настоящая степь, сухая степь и полупустыня. Общая площадь сельскохозяйственных земель, охваченная данным исследованием, составляет 7 млн. 238 тыс. га, площадь пашни – 4 млн. 696 тыс. га (https://rosstat.gov.ru). Площадь пашни по зонам распределена следующим образом: настоящая степь – 1 млн. 769 тыс. га; сухая степь – 2 млн. 657 тыс. га; полупустыня – 270 тыс. га.

В данной работе лесомелиоративные системы представлены зональными типами. За основу взята классификация оптимальных лесомелио-

ративных систем (ОЛС) разработанная Васильевым М.Е. для сухой степи Казахстана и Алтайского края, так как условия данных территорий схожи с условиями Волгоградского региона [3]. Сформированное автором понятие характеризует ОЛС как комплекс мелиоративно взаимосвязанных лесных полос разного назначения и уровня, обладающих в конкретных физико-географических условиях мелиоративно-защитным эффектом и наиболее высокой биологической устойчивостью. По данной классификации зональные системы включают группу административных районов одной географической области с типичными признаками, в которых рельеф, почвы, агропроизводственные и другие особенности соединяются в одну агролесомелиоративную подзону или зону, занимая площадь более 1 млн. га.

Схема создания полезащитных насаждений в регионе преимущественно 4-х рядная, два внутренних ряда главные породы, два крайних ряда сопутствующие. В насаждениях преимущественно используются следующие породы деревьев и кустарников (таблица 2), адаптированных к почвенно-климатическим условиям региона и рекомендованных для ЗЛН [41].

Таблица 2.

Породный и видовой состав главных и сопутствующих древесных и кустарниковых растений в защитных лесных насаждениях Волгоградской области (по зонам)

№ п/п	Зона	Главные	Сопутствующие	
			древесные	кустарники
1.	Настоящая степь	*Quercus* L., *Betula* L., *Fraxinus* L., *Pinus* L. (на песках)	*Acer platanoides* L., *Tilia cordata* Mill., *Pyrus* L., *Malus* Hill.	*Ribes aureum* Pursh, *Ribes nigrum* L., *Lonicera*, *Corylus avellana* L.
2.	Сухая степь	*Ulmus pumila* L., *Quercus robur* L., *Robinia pseudoacacia* L., *Fraxinus lanceolate* Borkh.	*Acer tataricum* L., *Pyrus* L.	*Ribes aureum* Pursh, *Lonicera* L., *Tamarix* L.
3.	Полупустыня	*Ulmus* L., *Robínia pseudoacácia* L.	*Acer tataricum* L., *Morus alba* L.	*Ribes aureum* , Pursh, *Elaeagnus angustifolia* L., *Tamarix* L.

Расчеты существующих искусственных лесных насаждений проведены по данным инвентаризации 2015 года предоставленных Комитетом природных ресурсов, лесного хозяйства и экологии Волгоградской области [34; 56].

Агролесомелиоративные системы (АЛС) Волгоградского региона включают следующие виды насаждений: полезащитные лесные насаждения (ветрорегулирующие, стокорегулирующие); противоэрозионные насаждения (прибалочные и приовражные); придорожные. При расчете лесистости пашни использовались показатели имеющихся полезащитных и противоэрозионных насаждений (ПЗЛН), размещенных на пашне. Расчет земель сельскохозяйственного назначения, включая пашню на предмет их лесистости, опубликован в более ранней работе автора [56]. Общая лесистость земель пашни Волгоградского региона составляет – 1.3 %. По зонам распределение следующее: настоящая степь – 1.4 %; сухая степь – 1.3 %; полупустыня – 1.4 %.

В соответствии с научно-обоснованными нормами размещения лесомелиоративных систем, защитные насаждения должны занимать 1.5-3% общей площади земель сельскохозяйственного назначения в зависимости от агроклиматических, геоморфологических условий, степени расчлененности и эродированности земель [42]. На легких песчаных почвах и склонах крутизной более 5°, площадь отвода земель под данный вид насаждений увеличивается до 5-7%.

Расчет лесистости земель сельскохозяйственного назначения и земель пашни как в целом по субъекту, так и по административным районам проводился по Методике расчета показателя «Лесистость территории Российской Федерации» Приказ Рослесхоза № 650 от 06.05.2022 года (https://legalacts.ru). В соответствии с пунктом 9.3 «расчет показателя осуществляется по землям лесного фонда и землям иных категорий, на которых расположены леса», по следующей формуле:

$$Lтер = (Sплрз / Sсуб.) \times 100 \quad (1)$$

где: Lтер - лесистость территории субъекта, процент (%);

Sплрз - площадь покрытых лесной растительностью земель сельскохозяйственного назначения субъекта, тысяча га;

Sсуб. - площадь субъекта, тысяча га.

Статистика региональных показателей сельскохозяйственной деятельности представлена по данным Росстата (https://rosstat.gov.ru).

Математическая обработка данных была проведена методами корреляций, множественной регрессии, критерием Фишера. Достоверность определена по t критерию. Для визуализации результатов в виде диаграмм и графиков использована программа Excel.

Методологический подход к расчету доли влияния изучаемых факторов на урожайность озимой пшеницы на территории Волгоградской области

Объектами исследований являлись 12 районов области, лесистость земель сельскохозяйственного назначения которых равна либо выше 1.5 %,

представлено на рисунке 1. В данном исследовании, этот показатель лесистости признан оптимальным.

В исследованиях также использовались показатели урожайности озимой пшеницы среднее по объектам исследований за 50-ти летний период, гумуса (%), влагообеспеченности (среднее количество осадков по объектам исследований за 50-ти летний период). Осадки рассчитывались по данным зарегистрированных в сети Росгидромет метеостанций Волгоградской области [2].

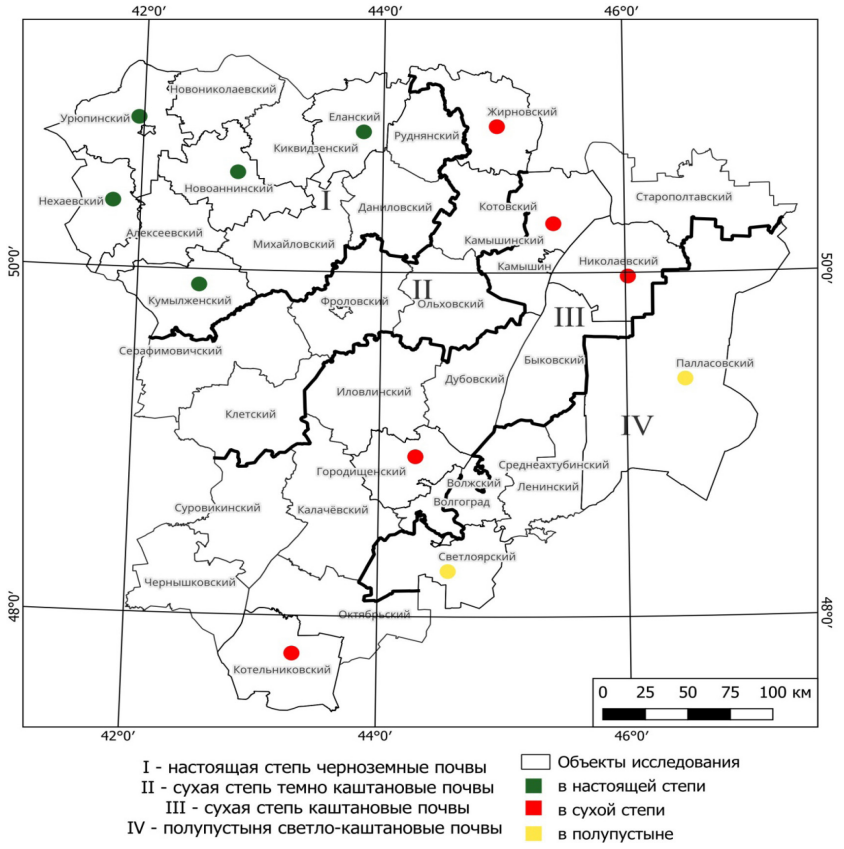


Рис. 1. Карта объектов исследований (районов). Объекты в настоящей степи обозначены зелеными кружками, в сухой степи красными, в полупустыне желтыми. Горизонтальные линии показывают нижние границы существующих зон по Овчинникову А.С. [19].

Методология статистического анализа включала решение следующих задач:

Построение линейной модели на основе уравнения множественной регрессии. На основе стандартизованных коэффициентов регрессии и средних коэффициентов эластичности проведение ранжирования факторов по степени их влияния на урожайность. Проведение поиска и анализа коэффициентов парной, частной и множественной корреляции. С помощью F-критерия Фишера проведение оценки статистической надежности уравнения регрессии и коэффициента детерминации R^2. Применением критерия Стьюдента оценка статистическая значимость коэффициентов чистой регрессии.

Результаты

Проведена обработка данных урожайности за 50-ти летний период по объектам исследований, построены длительные временные ряды. Выполнен анализ показателей, он подтвердил их зональные различия. На рисунке 2 представлены индивидуальные особенности урожайности озимой пшеницы по зонам в сравнении со средней урожайностью по области. Это объясняется зональными особенностями территорий объектов исследований: показателями плодородия, количеством выпадающих осадков, представленными в табл. 1.

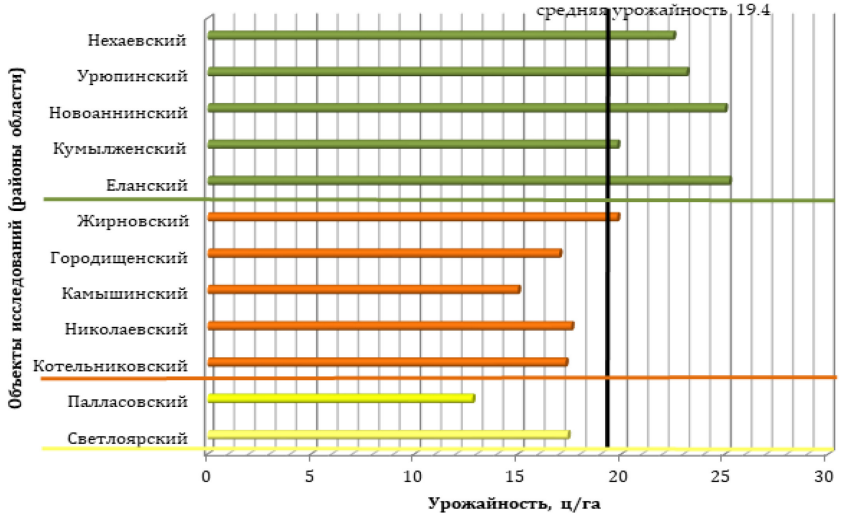


Рис. 2. Средняя урожайность озимой пшеницы на объектах исследований по зонам области (1973-2022 гг). Цветовые обозначения: зеленый цвет – настоящая степь; оранжевый цвет – сухая степь; желтый цвет – полупустыня.

Проведено исследование по оценке возможной зависимости урожайности озимой пшеницы и имеющихся площадей защитных лесных насаждений, представлено на рисунке 3.

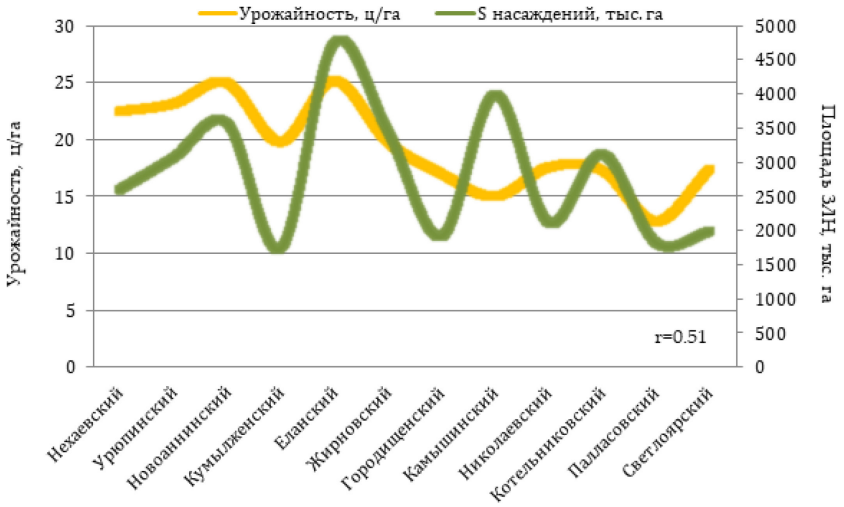


Рис. 3. Зависимости урожайности и площадей ЗЛН по объектам исследований.

При вычислении корреляционной зависимости расчеты показали среднюю связь между урожайностью и имеющимися площадями защитных лесных насаждений – 0.51. По результатам оценки достоверности коэффициента корреляции критическое значение критерия Стьюдента составило $t_г = 1.86$, превышая $t_{крит} = 1.81$, что свидетельствует о статистической значимости коэффициента корреляции при уровне значимости α 0.10.

При расчете корреляционной зависимости между урожайностью и показателем почвенного плодородия, гумусом, коэффициент показал тесную связь – 0,85 . Критическое значение критерия Стьюдента составило $t_г = 5.12$, что превышает $t_{крит} = 3.16$ при уровне значимости α 0.01.

При расчете корреляционной связи между урожайностью и средней суммой осадков за 50-ти летний период, выявлена сильная корреляционная зависимость 0.86. Значимость подтверждена критерием Стьюдента, который составил $t_г = 5.36$, превысив $t_{крит} = 3.16$, при уровне значимости α 0.01.

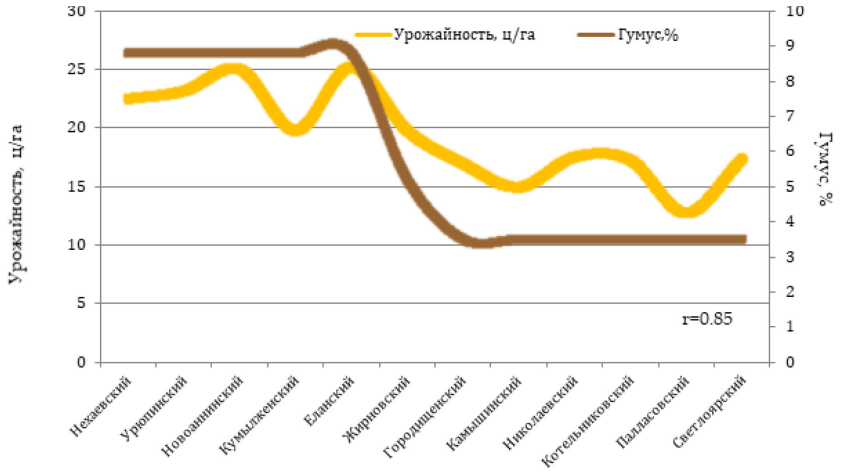


Рис. 4. Зависимости урожайности и почвенного плодородия (гумус) по объектам исследований.

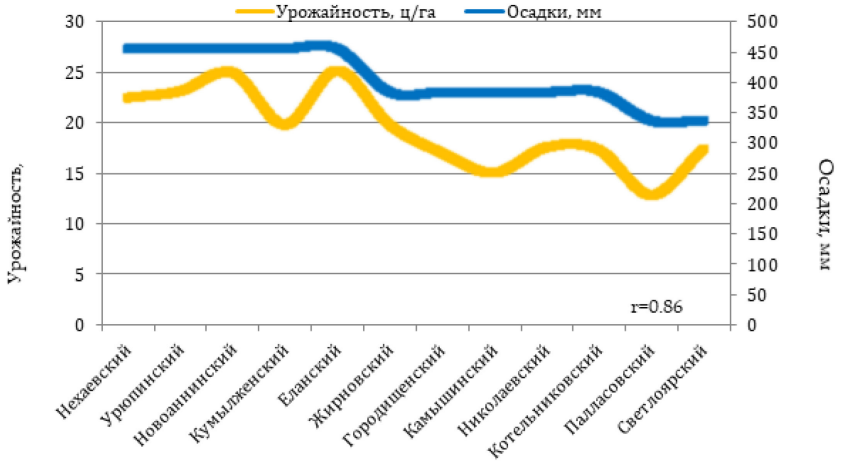


Рис. 5. Зависимости урожайности и влагообеспеченности (количества осадков) по объектам исследований.

Основной целью данного исследования являлось определение достоверности влияния комплекса факторов: лесистость территорий в виде площадей защитных лесных насаждений, почвенного плодородия (гумус) и количества осадков на урожайность озимой пшеницы. Рас-

считанный коэффициент детерминации R^2=0.824 в регрессионной модели свидетельствует, что 82.4% вариаций в урожайности объясняются исследуемыми факторами: оптимальной лесистостью земель сельскохозяйственного назначения в виде площадей защитных насаждений, плодородием (гумус) и годовыми суммами осадков. Остальные проценты приходятся на неучтенные в данном исследовании факторы: используемые сорта, применяемые удобрения, температура, число обработок почвы и другие. Стандартная ошибка составила 1.928, что характеризует отклонение значений от линии регрессии в среднем на 1.928 единицы. Общая F статистика 12.52. Статистическая значимость данной модели составляет 0.0021, что ниже α 0.05.

Таблица 3.

Значимость полученных p-значений изучаемых факторов в регрессионной модели

№ п/п	Факторы	Коэффициенты	p-значение	Соответствие уровню значимости
1.	Площади ЗЛН, тыс. га	0.001012	0.1649	не значим
2.	Гумус, %	0.667362	0.1830	α 0.1
3.	Осадки, мм	0.026314	0.4028	α 0.1

Примечание: Полученные p-значения факторов почвенного плодородия (гумус) 0.18 и осадков 0.40 статистически значимы при α 0.10.

Обсуждение

Исследования влияния агролесомелиоративных систем на урожайность сельскохозяйственных культур

Первые доступные публичные оценки влияния агролесомелиоративных насаждений на урожайность сельскохозяйственных культур засушливых территорий России относятся к началу XX века. С 1954 года в Советском Союзе проводились массовые исследования по определению влияния лесных полос на урожайность различных сельскохозяйственных культур. По их результатам в степной и лесостепной областях Украины прибавка урожая зерна составляла 25 - 100% на удаленных от насаждений объектах до 20 высот (20Н), по сравнению с урожайностью на незащищенных полях [20]. Также изучалось влияние насаждений на элементы структуры урожая: число зерен в колосе, масса 1000 зерен [20]. Был доказан положительный эффект. По результатам исследований в Центрально Черноземной России также был выявлен эффект влияния отдельных полос на продуктивность возделываемых

сельскохозяйственных культур: у зерновых на 25%, овощей до 50%, трав до 100% [17]. Несмотря на вековые опыты агролесомелиоративных практик в Европе, доступные результаты исследований по влиянию насаждений на урожайность сельскохозяйственных культур, относятся ко второй половине XX века [60]. Исследователи из Пакистана доказали зависимость изменения урожайности от удаленности от насаждений. Увеличенные показатели наблюдались при удалении объектов до 12 метров [44]. Был сделан вывод об отсутствии влияния на урожайность видового состава насаждений. Результаты исследований по влиянию эвкалиптовых насаждений на урожайность пшеницы и хлопка в пустыне ТАР, показали увеличение показателей только у хлопка, с максимальными значениями урожая на расстоянии 60-75 м от насаждений [60]. Многолетние опыты по изучению влияния 30-ти летних насаждений на урожайность сераделлы, картофеля, люпина, овса и его смеси с ячменем показали наименьшую их урожайность вблизи насаждений 1Н, максимальный эффект проявился на расстоянии 3-10 Н. Показатель урожайности зеленой массы сераделлы превысил контроль на 50%, семян на 37%, картофеля на 30%. Чистая культура овса увеличила урожайность до 17% [57]. В настоящее время, как в России, так и в европейских странах, активно проводятся исследования изучающие влияние насаждений на продуктивность конкретных территорий, полей севооборотов, отдельных культур и ряда показателей: микроклимата, эрозионных процессов, продукционных циклов, урожайности, физиологических процессов [4].

Середина XX века – начало формирования в России новой агролесомелиоративной парадигмы. Она заключается в трехмерной оценке агроландшафта и на основе нелинейного подхода заполнение пространства различными видами искусственных насаждений, с целью создания многофункциональных высокопродуктивных агролесоландшафтных комплексов [11; 12; 13; 23; 26]. В связи с этим изменился подход к исследованиям влияния агролесомелиоративных систем на продуктивность земель. Стали применяться комплексные подходы [5]. В исследования добавилось изучение комплексных показателей почв, их систем обработки [4; 6-9]. До настоящего времени не достаточно данных по достоверности вклада различных факторов влияния на урожайность сельскохозяйственных культур, включая фактор лесистости в виде площадей защитных лесных насаждений. Настоящее исследование регионального уровня (Волгоградская область), представляет новое знание по достоверности влияния изучаемых

факторов на урожайность *Triticum aestivum* ведущей продовольственной культуры засушливых территорий.

Выводы

1. Проведен анализ урожайности озимой пшеницы за длительный период с 1973 по 2022 гг, по объектам исследований (районы области), который подтвердил значимое влияние на значение показателей почвенно-климатических условий.
2. Корреляционная зависимость урожайности с изучаемыми факторами составила: по показателю лесистость территорий в виде площадей защитных лесных насаждений r=0.51, средняя степень влияния. Почвенное плодородие (гумус) r=0.85 и влагообеспеченности (осадки) r=0.86 сильная степень влияния. Достоверность полученных зависимостей подтверждена t критерием.
3. Полученный в регрессионной модели коэффициент детерминации R^2=0.824 свидетельствует, что 82.4% вариаций в урожайности объясняются исследуемыми факторами: оптимальной лесистостью земель сельскохозяйственного назначения в виде площадей защитных насаждений, плодородием (гумус) и осадками. Остальной процент приходится на неучтенные в исследовании факторы.
4. Данное исследование показывает наличие влияния фактора ЗЛН, в комплексе показателей, на продуктивность земель сельскохозяйственного назначения, представленную урожайностью озимой пшеницы. Выводы подтверждают необходимость создания искусственных насаждений в объемах соответствующих показателю оптимальной лесистости, с целью более эффективного функционирования земель сельскохозяйственного назначения.

Информация о спонсорстве. Работа выполнена в рамках исполнения вопроса Государственного задания (ГЗ) «Теоретические основы функционирования и природно-антропогенной трансформации агролесоландшафтных комплексов в переходных природно-географических зонах, закономерности и прогноз их деградации и опустынивания на основе геоинформационных технологий, аэрокосмических методов и математико-картографического моделирования в современных условиях» (рег. № 122020100311-3).

Благодарности. Автор благодарит младшего научного сотрудника лаборатории геоинформационного моделирования и картографирования агролесоландшафтов ФНЦ агроэкологии РАН А.А. Васильченко за картографический материал, подготовленный к статье.

Список литературы

1. Сарычев, А. Н., Михальков, Д. Е., Вдовенко, А. В., & Воробьёва, О. М. (2021). Агроэкологические условия возделывания озимой пшеницы под защитой лесных полос. *Аграрный вестник Урала*, *1*(204), 11–20. https://doi.org/10.32417/1997-4868-2021-204-01-11-20. EDN: https://elibrary.ru/IUBBMJ
2. Архив климатических данных ВНИИГМИМЦЦ [Электронный ресурс]. Обнинск, 1997. URL: http://meteo.ru/it/178-aisori (дата обращения: 12.02.2024).
3. Васильев, М. Е. (1978). *Защитное лесоразведение в сухой степи Алтайского края и Северного Казахстана* [Автореф. дис. … дра с.-х. наук] (37 с.). Ленинград. EDN: https://elibrary.ru/QGJBED
4. Васильев, Ю. И., Сарычев, А. Н., & Сергеева, И. С. (2009). Формирование биопродуктивного потенциала и его влияние на урожай в зоне влияния лесной полосы. *Аграрный вестник Урала*, *4*(58), 89–92. EDN: https://elibrary.ru/PMXDYH
5. Васильев, Ю. И., Волошенкова, Т. В., & Овечко, Н. Н. (2013). Методология прогноза варьирования урожая зерновых культур в агролесоландшафте в связи с нестабильностью климатических характеристик. *Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук*, *4*, 54–57. EDN: https://elibrary.ru/QCNHRJ
6. Васильев, Ю. И., Турко, С. Ю., & Сарычев, А. Н. (2014). Моделирование агрономического влияния лесных полос в их системах с разными параметрами. *Пути повышения эффективности орошаемого земледелия: Сборник научных трудов*, *562*, 5–14. EDN: https://elibrary.ru/SZNVWF
7. Васильев, Ю. И., & Турко, С. Ю. (2015). К вопросу о прибавке урожайности озимой пшеницы на лесомелиорированной территории и возникновении определённых рисков. *Пути повышения эффективности орошаемого земледелия*, *3*(59), 68–73. EDN: https://elibrary.ru/UIYPKR
8. Васильев, Ю. И., Турко, С. Ю., & Овечко, Н. Н. (2016). Математическое моделирование многолетнего варьирования урожайности озимой пшеницы на открытом и облесенном пространстве. *Российская сельскохозяйственная наука*, *1*, 38–41. EDN: https://elibrary.ru/VMBFZZ
9. Волошенкова, Т. В. (2018). Ресурсосберегающие технологии и устойчивость почв к дефляции в агролесоландшафтах юга России. *Новости науки в АПК*, *1*(10), 28–32. https://doi.org/10.25930/2218-855x-1-10-4350. EDN: https://elibrary.ru/GFXDGR
10. Воробьёв, А. В. (1992). Земельные ресурсы. В: *Почвенноэкологические проблемы в степном земледелии (предложения по рациональному исполь-*

зованию почвенных ресурсов Волгоградской области) (с. 16–22). Пущино: Институт почвоведения и фотосинтеза.

11. Ивонин, В. М. (2023). Синергетика систем агролесомелиорации. *Региональные геосистемы*, *47*(1), 62–75. https://doi.org/10.52575/2712-7443-2023-47-1-62-75. EDN: https://elibrary.ru/OGKKIX
12. Ивонин, В. М. (2024). Регенеративная агролесомелиорация. *Региональные геосистемы*, *48*(1), 30–44. https://doi.org/10.52575/2712-7443-2024-48-1-30-44. EDN: https://elibrary.ru/TMQEUH
13. Ивонин, В. М. (2024). Теоретическая концепция агролесомелиоративных систем. *Орошаемое земледелие*, *1*(44), 59–64. https://doi.org/10.35809/2618-8279-2024-1-9. EDN: https://elibrary.ru/ILDRGH
14. Кулик, К. Н., & Пугачёва, А. М. (2016). Лесомелиорация — основа создания устойчивых агроландшафтов в условиях недостаточного увлажнения. *Лесотехнический журнал*, *6*(3/23), 29–40. EDN: https://elibrary.ru/WMUWWL
15. Кулик, К. Н., Беляев, А. И., & Пугачёва, А. М. (2023). Роль защитного лесоразведения в борьбе с засухой и опустыниванием в агроландшафтах. *Аридные экосистемы*, *13*(1), 1–10. https://doi.org/10.1134/S2079096123010079. EDN: https://elibrary.ru/OSGDIB
16. Макар, С. В. (2012). Устойчивость развития лесного потенциала регионов России как оценка эффективности стратегий его реализации. *Региональная экономика: теория и практика*, *2*, 9–19. EDN: https://elibrary.ru/ONWPJB
17. Молчанов, А. А. (1966). *Оптимальная лесистость (на примере ЦЧР)* (126 с.). Москва: Наука.
18. Недикова, Е. В., Чечин, Д. И., & Краснянская, Е. В. (2022). Совершенствование лесомелиоративного устройства пахотных земель. *Землеустройство, кадастр и мониторинг земель*, *10*, 637–642. https://doi.org/10.33920/sel-04-2210-02. EDN: https://elibrary.ru/RZQZTD
19. Овчинников, А. С., Балашова, Н. Н., & Иванова, Н. В. (2014). Стратегия комплексного развития сельских территорий и эффективного функционирования агропромышленного комплекса Волгоградской области в условиях ВТО. *Экономика сельскохозяйственных и перерабатывающих предприятий*, *1*, 16–20. EDN: https://elibrary.ru/RUNKZJ
20. Логгинов, Б. И. (1961). *Основы полезащитного лесоразведения* (353 с.). Киев: издательство УАСХН.
21. Сарычев, А. Н., Михальков, Д. Е., Мищенко, Е. В., и др. (2023). Особенности формирования урожайности и показателей качества зерна озимой пшеницы в агролесоландшафте. *Аграрная Россия*, *10*, 25–30. https://doi.org/10.30906/1999-5636-2023-10-25-30. EDN: https://elibrary.ru/GFMGJF

22. Сергеева, И. С., Васильев, Ю. И., Овечко, Н. Н., и др. (2010). Оценка почвозащитного влияния лесных полос с учётом их возрастного аспекта при новых условиях землепользования на пашне сухой степи Нижнего Поволжья. *Аграрный вестник Урала*, *8*(74), 64–66. EDN: https://elibrary.ru/MVLKXR
23. Гордеев, А. В., & Романенко, Г. А. (ред.). (2008). *Проблемы деградации и восстановления продуктивности сельскохозяйственных земель в России* (68 с.). Москва: Росинформагротех.
24. Пугачёва, А. М. (2018). Агролесомелиоративные системы — основа развития земледелия. *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование*, *1*(49), 227–237. https://doi.org/10.32786/2071-9485-2018-01-227-237. EDN: https://elibrary.ru/YZKGZV
25. Рулев, А. С., & Пугачёва, А. М. (2019). Развитие растениеводства на региональном уровне (на примере Волгоградской области). *Исследования экономического развития России*, *30*(5), 557–562. https://doi.org/10.1134/S1075700719050113. EDN: https://elibrary.ru/ZRSBHL
26. Рулев, А. С., & Пугачёва, А. М. (2019а). Формирование новой агролесомелиоративной парадигмы. *Вестник Российской академии наук*, *89*(10), 1044–1051. https://doi.org/10.31857/S0869-587389101044-1051. EDN: https://elibrary.ru/GPUZVY
27. Рулева, О. В. (2014). Модель производственного процесса выращивания сельскохозяйственных культур в орошаемых агролесомелиоративных ландшафтах. *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование*, *3*(35), 62–68. EDN: https://elibrary.ru/SPWSHT
28. Рулев, А. С., & Рулева, О. В. (2015). Геопространственная парадигма в управлении биопродуктивностью агролесоландшафтов. *Научная жизнь*, *6*, 68–77. EDN: https://elibrary.ru/VJOZNH
29. Рулева, О. В., Рулев, А. С., & Овечко, Н. Н. (2015). Расчёт суточного прироста биомассы кукурузы в орошаемых агролесоландшафтах. *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*, *5*(55), 53–57. EDN: https://elibrary.ru/UZBXUF
30. Рулева, О. В., & Овечко, Н. Н. (2016). Закономерности развития сельскохозяйственных культур в богарных и орошаемых агролесоландшафтах. *Вестник российской сельскохозяйственной науки*, *4*, 18–20. EDN: https://elibrary.ru/WEZWFV
31. Рулева, О. В., & Овечко, Н. Н. (2018). Динамика скорости ветра в орошаемых агролесоландшафтах. *Метеорология и гидрология*, *9*, 97–103. EDN: https://elibrary.ru/XZITYL

32. Сарычев, А. Н., Костин, М. В., & Плескачев, Ю. Н. (2021). Влияние защитных лесных насаждений и приёмов обработки почвы на агрофизические свойства каштановых почв и урожайность сельскохозяйственных культур. *Лесной вестник. Forestry Bulletin*, *25*(6), 63–70. https://doi.org/10.18698/2542-1468-2021-6-63-70. EDN: https://elibrary.ru/IZCHLI
33. Рулева, О. В., & Овечко, Н. Н. (2016). Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016662346 Российская Федерация. *Определение размера малой выборки масличных культур в зоне влияния лесных полос* (№ 2016619724; заявл. 14.09.2016; опубл. 08.11.2016). Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук». EDN: https://elibrary.ru/APFMKA
34. Пугачёва, А. М., Беляев, А. И., & Трубакова, К. Ю. (2023). Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2023622960 Российская Федерация. *Зональная агролесомелиоративная система сухих степей Волгоградской области* (№ 2023622402; заявл. 26.07.2023; опубл. 28.08.2023). Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук». EDN: https://elibrary.ru/YGTUTX
35. Рулева, О. В., & Овечко, Н. Н. (2016). Патент № 2603903 C1 Российская Федерация, МПК A01G 7/00, A01G 1/00. *Способ расчёта биомассы растений в межполосном пространстве* (№ 2015139780/13; заявл. 18.09.2015; опубл. 10.12.2016). Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук» (ФНЦ агроэкологии РАН). EDN: https://elibrary.ru/PLZREF
36. Рулева, О. В., & Овечко, Н. Н. (2017). Значение лесных полос при формировании урожая орошаемых сельскохозяйственных культур. *Пути повышения эффективности орошаемого земледелия*, *1*(65), 128–134. EDN: https://elibrary.ru/YIYBFR
37. Рулева, О. В., & Овечко, Н. Н. (2017). *Биопродуктивность орошаемых агролесоландшафтов: модели и прогнозы* (115 с.). Волгоград: ФНЦ агроэкологии РАН. ISBN: 9785990984127. EDN: https://elibrary.ru/CKQIMN
38. Рябинина, Н. О. (2011). Сохранение эталонных степных экосистем и ландшафтов Волгоградской области. *Бык. Волгоград. Государственный университет*, *3*, 231–238. EDN: https://elibrary.ru/NWGBCF
39. Сажин, А. Н., Кулик, К. Н., & Васильев, Ю. И. (2017). *Погода и климат Волгоградской области* (2е изд., перераб. и доп.; 334 с.). Волгоград: Фе-

деральный исследовательский центр агроэкологии Российской академии наук. ISBN: 9785900761008. EDN: https://elibrary.ru/WNPTAJ

40. Рулева, О. В., & Овечко, Н. Н. (2017). Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017663290 Российская Федерация. *Расчёт фотосинтетического потенциала озимой пшеницы за вегетационный период в облесенном агролесоландшафте* (№ 2017660190; заявл. 10.10.2017; опубл. 28.11.2017). Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук». EDN: https://elibrary.ru/WJCBHC
41. Кулик, К. Н., Барабанов, А. Т., Жданов, Ю. М., и др. (2017). *Стратегия развития защитного лесоразведения в Волгоградской области на период до 2025 года* (39 с.). Волгоград: Федеральный научный центр агроэкологии, комплексной мелиорации земель и защитного лесоразведения Российской академии наук. ISBN: 9785900761961. EDN: https://elibrary.ru/YJFHJZ
42. *Стратегия развития защитного лесоразведения в Российской Федерации на период до 2025 года* (34 с.). Волгоград: ВНИАЛМИ, 2014.
43. Рулева, О. В., & Овечко, Н. Н. (2018). Патент № 2661829 C1 Российская Федерация, МПК A01G 7/00, A01G 23/00. *Способ оценки урожая и продуктивности орошаемых сельскохозяйственных культур в лесозащищённых ландшафтах* (заявл. 18.01.2017; опубл. 19.07.2018). Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук» (ФНЦ агроэкологии РАН). EDN: https://elibrary.ru/ZEJAHB
44. Akbar, G., Ahmad, M., Rafique, S., et al. (1990). Effect of trees on the yield of wheat crop. *Agroforestry Systems*, *11*, 1–10. https://doi.org/10.1007/BF00122808. EDN: https://elibrary.ru/XLMQIW
45. Ameha, N., & Asfaw, Z. (2024). Orientation and root trench effects of *Eucalyptus globulus* boundary plantations on barley yield and soil physicochemical properties in the Gummer district, Central Highlands, Ethiopia. *Agroforestry Systems*, *98*, 1461–1473. https://doi.org/10.1007/s10457-024-01015-5. EDN: https://elibrary.ru/YGWEVG
46. Arkhipova, M. V. (2020). Forest cover changes in the center of East European Plain over the last 150 years. *Contemporary Problems of Ecology*, *13*(7), 825–834. https://doi.org/10.1134/S1995425520070033. EDN: https://elibrary.ru/JJJJRH
47. Chemura, A., Yalew, A. W., & Gornott, C. (2021). Quantifying agroforestry yield buffering potential under climate change in the smallholder maize farming

systems of Ethiopia. *Frontiers in Agronomy*, *3*, 609536. https://doi.org/10.3389/fagro.2021.609536. EDN: https://elibrary.ru/LRHRQF

48. Eichhorn, M. P., Paris, P., Herzog, F., Incolli, L. D., Liagre, F., Mantzanas, K., et al. (2006). Silvoarable systems in Europe — past, present and future prospects. *Agroforestry Systems*, *67*, 29–50. https://doi.org/10.1007/s10457-005-1111-7. EDN: https://elibrary.ru/MWIXGC
49. García de Jalón, S., Graves, A., Palma, J. H. N., Williams, A., Upson, M., & Burgess, P. J. (2018). Modelling and valuing the environmental impacts of arable, forestry and agroforestry systems: a case study. *Agroforestry Systems*, *92*, 1059–1073. https://doi.org/10.1007/s10457-017-0128-z. EDN: https://elibrary.ru/IBGMSS
50. Ivezić, V., Yu, Y., & Werf, W. v. d. (2021). Crop yields in European agroforestry systems: a metaanalysis. *Frontiers in Sustainable Food Systems*. https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.606631. EDN: https://elibrary.ru/PFSRCW
51. Kanzler, M., Böhm, C., & Mirck, J., et al. (2019). Microclimate effects on evaporation and winter wheat (Triticum aestivum L.) yield within a temperate agroforestry system. *Agroforestry Systems*, *93*, 1821–1841. https://doi.org/10.1007/s10457-018-0289-4. EDN: https://elibrary.ru/ROXZGS
52. Kachova, V., Hinkov, G., Popov, E., et al. (2018). Agroforestry in Bulgaria: history, presence status and prospects. *Agroforestry Systems*, *92*, 655–665. https://doi.org/10.1007/s10457-016-0029-6. EDN: https://elibrary.ru/OPFEJL
53. Krčmarova, J., & Jelecek, J. (2017). Czech traditional agroforestry: historic accounts and current status. *Agroforestry Systems*, *91*, 1087–1100. https://doi.org/10.1007/s10457-016-9985-0. EDN: https://elibrary.ru/IRLOKX
54. Nerlich, K., GraeffHönninger, S., & Claupein, W. (2013). Agroforestry in Europe: a review of the disappearance of traditional systems and development of modern agroforestry practices, with emphasis on experiences in Germany. *Agroforestry Systems*, *87*, 475–492. https://doi.org/10.1007/s10457-012-9560-2. EDN: https://elibrary.ru/KVVKBN
55. Pugacheva, A. M. (2021). Effects exercised by artificial forest stands on the restoration of secondary virgin lands in agroforest landscapes of dry steppes. *Biology Bulletin*, *48*, 199–206. https://doi.org/10.1134/S1062359021020096. EDN: https://elibrary.ru/TBJFMJ
56. Pugacheva, A. M. (2023). Functionality of zonal agroforestry systems on agricultural land of dry territories. *Forests*, *14*(12), 2364. https://doi.org/10.3390/f14122364. EDN: https://elibrary.ru/AVBZAQ
57. Pretzschel, M., Bohme, G., & Krause, H. (1991). Effects of shelterbelts on crop yield. *Feldwirtschaft*, *32*, 229–231.

58. Tubalov, A. A. (2023). Spatial principles of territories selection for priority development of agroforestry complexes. *Forests*, *14*, 1225. https://doi.org/10.3390/f14061225. EDN: https://elibrary.ru/EHLZWH
59. Thiesmeier, A. (2024). Comparing the economic performance of poplarbased alley cropping systems with arable farming in Brandenburg under varying site conditions and policy scenarios. *Agroforestry Systems*, *98*, 1507–1522. https://doi.org/10.1007/s10457-024-01021-7. EDN: https://elibrary.ru/SBRSBY
60. Sheikh, M. I., & Khalique, A. (1982). Effect of tree belts on the yield of agricultural crops. *Pakistan Journal of Forestry*, *32*, 21–23.
61. Jiang, S., Xiong, K., & Xiao, J. (2022). Structure and stability of agroforestry ecosystems: insights into the improvement of service supply capacity of agroforestry ecosystems under the karst rocky desertification control. *Forests*, *13*, 878. https://doi.org/10.3390/f13060878. EDN: https://elibrary.ru/WCQLEU
62. Quinkenstein, A., Wollecke, J., Böhm, C., Grunewald, H., Freese, D., Schneider, B., et al. (2009). Ecological benefits of the alley cropping agroforestry system in sensitive regions of Europe. *Environmental Science & Policy*, *12*, 1112–1121. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2009.08.008
63. Fisher, J., Zerger, A., Gibbons, P., Stott, J., & Law, B. S. (2010). Tree decline and the future of Australian farmland biodiversity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *107*, 19597–19602. https://doi.org/10.1073/pnas.1008476107
64. Wolz, J. K., & DeLucia, E. H. (2018). Alley cropping: global patterns of species composition and function. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *252*, 61–68. https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.10.005
65. Yukhnovskyi, V., Polishchuk, O., Lobchenko, G., et al. (2021). Aerodynamic properties of windbreaks of various designs formed by thinning in central Ukraine. *Agroforestry Systems*, *95*, 855–865. https://doi.org/10.1007/s10457-020-00503-8. EDN: https://elibrary.ru/BAVVNE
66. Федеральная служба государственной статистики [Электронный ресурс]. URL: http://www.gks.ru (дата обращения: 15.02.2024).
67. Росстат [Эл. ресурс]. URL: https://rosstat.gov.ru/ (дата обращения: 05.03.2024).
68. Единый государственный реестр почвенных ресурсов России [Электронный ресурс]. URL: https://egrpr.esoil.ru (дата обращения: 12.03.2024).
69. Правовая система «Легалакт» [Электронный ресурс]. URL: https://legalacts.ru (дата обращения: 18.03.2024).

References

1. Sarychev, A. N., Mikhal'kov, D. E., Vdovenko, A. V., & Vorob'yeva, O. M. (2021). Agroecological conditions for winter wheat cultivation under the pro-

tection of forest belts. *Agrarian Bulletin of the Urals*, *1*(204), 11–20. https://doi.org/10.32417/1997-4868-2021-204-01-11-20. EDN: https://elibrary.ru/IUBBMJ

2. AllRussia Research Institute of Hydrometeorological Information — World Data Center (VNIIIGMIMDC). *Climate data archive* [Electronic resource]. Obninsk, 1997. URL: http://meteo.ru/it/178-aisori (accessed: 12.02.2024).
3. Vasil'ev, M. E. (1978). *Protective afforestation in the dry steppe of Altai Krai and Northern Kazakhstan* [Author's abstract of Doctoral Dissertation in Agricultural Sciences] (37 pp.). Leningrad. EDN: https://elibrary.ru/QGJBED
4. Vasil'ev, Yu. I., Sarychev, A. N., & Sergeeva, I. S. (2009). Formation of bioproductive potential and its impact on yield in the zone of forest belt influence. *Agrarian Bulletin of the Urals*, *4*(58), 89–92. EDN: https://elibrary.ru/PMXDYH
5. Vasil'ev, Yu. I., Voloshenkova, T. V., & Ovechko, N. N. (2013). Methodology for forecasting yield variation of grain crops in agroforest landscapes in relation to climatic instability. *Reports of the Russian Academy of Agricultural Sciences*, *4*, 54–57. EDN: https://elibrary.ru/QCNHRJ
6. Vasil'ev, Yu. I., Turko, S. Yu., & Sarychev, A. N. (2014). Modeling agronomic influence of forest belts in their systems with different parameters. In *Ways to improve the efficiency of irrigated agriculture: Collection of scientific papers*, *56*(2), 5–14. EDN: https://elibrary.ru/SZNVWF
7. Vasil'ev, Yu. I., & Turko, S. Yu. (2015). On the issue of winter wheat yield increase in forestameliorated areas and associated risks. *Ways to improve the efficiency of irrigated agriculture*, *3*(59), 68–73. EDN: https://elibrary.ru/UIYPKR
8. Vasil'ev, Yu. I., Turko, S. Yu., & Ovechko, N. N. (2016). Mathematical modeling of longterm yield variation of winter wheat in open and forested areas. *Russian Agricultural Science*, *1*, 38–41. EDN: https://elibrary.ru/VMBFZZ
9. Voloshenkova, T. V. (2018). Resourcesaving technologies and soil resistance to deflation in agroforest landscapes of southern Russia. *Science News in AgroIndustrial Complex*, *1*(10), 28–32. https://doi.org/10.25930/2218-855x-1-10-4350. EDN: https://elibrary.ru/GFXDGR
10. Vorob'yov, A. V. (1992). Land resources. In: *Soilecological problems in steppe agriculture (proposals for rational use of soil resources in Volgograd region)* (pp. 16–22). Pushchino: Institute of Soil Science and Photosynthesis.
11. Ivonin, V. M. (2023). Synergetics of agroforestry amelioration systems. *Regional Geosystems*, *47*(1), 62–75. https://doi.org/10.52575/2712-7443-2023-47-1-62-75. EDN: https://elibrary.ru/OGKKIX
12. Ivonin, V. M. (2024a). Regenerative agroforestry. *Regional Geosystems*, *48*(1), 30–44. https://doi.org/10.52575/2712-7443-2024-48-1-30-44. EDN: https://elibrary.ru/TMQEUH

13. Ivonin, V. M. (2024b). Theoretical concept of agroforestry systems. *Irrigated Agriculture*, *1*(44), 59–64. https://doi.org/10.35809/2618-8279-2024-1-9. EDN: https://elibrary.ru/ILDRGH
14. Kulik, K. N., & Pugacheva, A. M. (2016). Forest amelioration as a basis for creating sustainable agrolandscapes in insufficiently humidified conditions. *Forestry Engineering Journal*, *6*(3/23), 29–40. EDN: https://elibrary.ru/WMUWWL
15. Kulik, K. N., Belyaev, A. I., & Pugacheva, A. M. (2023). Role of protective afforestation in combating drought and desertification in agrolandscapes. *Arid Ecosystems*, *13*(1), 1–10. https://doi.org/10.1134/S2079096123010079. EDN: https://elibrary.ru/OSGDIB
16. Makar, S. V. (2012). Sustainability of forest potential development in Russian regions as an assessment of strategy implementation effectiveness. *Regional Economics: Theory and Practice*, *2*, 9–19. EDN: https://elibrary.ru/ONWPJB
17. Molchanov, A. A. (1966). *Optimal forest cover (case study of Central Chernozem Region)* (126 pp.). Moscow: Nauka.
18. Nedikova, E. V., Chechin, D. I., & Krasnyanskaya, E. V. (2022). Improving forest amelioration design of arable lands. *Land Management, Cadastre and Land Monitoring*, *10*, 637–642. https://doi.org/10.33920/sel-04-2210-02. EDN: https://elibrary.ru/RZQZTD
19. Ovchinnikov, A. S., Balashova, N. N., & Ivanova, N. V. (2014). Strategy for integrated development of rural territories and effective functioning of the agroindustrial complex of Volgograd Oblast under WTO conditions. *Economics of Agricultural and Processing Enterprises*, *1*, 16–20. EDN: https://elibrary.ru/RUNKZJ
20. Logginov, B. I. (1961). *Fundamentals of fieldprotective afforestation* (353 pp.). Kyiv: UASKhN Publishing House.
21. Sarychev, A. N., Mikhal'kov, D. E., Mishchenko, E. V., et al. (2023). Features of yield formation and grain quality indicators of winter wheat in agroforest landscape. *Agrarian Russia*, *10*, 25–30. https://doi.org/10.30906/1999-5636-2023-10-25-30. EDN: https://elibrary.ru/GFMGJF
22. Sergeeva, I. S., Vasil'ev, Yu. I., Ovechko, N. N., et al. (2010). Assessment of soilprotective influence of forest belts considering their age aspect under new land use conditions on arable land in the dry steppe of the Lower Volga region. *Agrarian Bulletin of the Urals*, *8*(74), 64–66. EDN: https://elibrary.ru/MVLKXR
23. Gordeev, A. V., & Romanenko, G. A. (Eds.). (2008). *Problems of degradation and restoration of agricultural land productivity in Russia* (68 pp.). Moscow: Rosinformagrotekh.

24. Pugacheva, A. M. (2018). Agroforestry systems as a basis for agricultural development. *Proceedings of the Lower Volga AgroUniversity Complex: Science and Higher Professional Education*, *1*(49), 227–237. https://doi.org/10.32786/2071-9485-2018-01-227-237. EDN: https://elibrary.ru/YZKGZV
25. Rulev, A. S., & Pugacheva, A. M. (2019). Development of crop production at the regional level (case study of Volgograd Oblast). *Studies of Economic Development of Russia*, *30*(5), 557–562. https://doi.org/10.1134/S1075700719050113. EDN: https://elibrary.ru/ZRSBHL
26. Rulev, A. S., & Pugacheva, A. M. (2019a). Formation of a new agroforestry paradigm. *Herald of the Russian Academy of Sciences*, *89*(10), 1044–1051. https://doi.org/10.31857/S0869-587389101044-1051. EDN: https://elibrary.ru/GPUZVY
27. Ruleva, O. V. (2014). Model of the production process of crop cultivation in irrigated agroforestry landscapes. *Proceedings of the Lower Volga AgroUniversity Complex: Science and Higher Professional Education*, *3*(35), 62–68. EDN: https://elibrary.ru/SPWSHT
28. Rulev, A. S., & Ruleva, O. V. (2015). Geospatial paradigm in managing bioproductivity of agroforest landscapes. *Scientific Life*, *6*, 68–77. EDN: https://elibrary.ru/VJOZNH
29. Ruleva, O. V., Rulev, A. S., & Ovechko, N. N. (2015). Calculation of daily biomass increment of maize in irrigated agroforest landscapes. *Proceedings of Orenburg State Agrarian University*, *5*(55), 53–57. EDN: https://elibrary.ru/UZBXUF
30. Ruleva, O. V., & Ovechko, N. N. (2016). Patterns of crop development in rainfed and irrigated agroforest landscapes. *Herald of Russian Agricultural Science*, *4*, 18–20. EDN: https://elibrary.ru/WEZWFV
31. Ruleva, O. V., & Ovechko, N. N. (2018). Dynamics of wind speed in irrigated agroforest landscapes. *Meteorology and Hydrology*, *9*, 97–103. EDN: https://elibrary.ru/XZITYL
32. Sarychev, A. N., Kostin, M. V., & Pleskachev, Yu. N. (2021). Influence of protective forest plantations and soil tillage methods on agrophysical properties of chestnut soils and crop yields. *Forestry Bulletin*, *25*(6), 63–70. https://doi.org/10.18698/2542-1468-2021-6-63-70. EDN: https://elibrary.ru/IZCHLI
33. Ruleva, O. V., & Ovechko, N. N. (2016). *Certificate of state registration of computer program No. 2016662346 Russian Federation. Determination of small sample size of oilseed crops in the zone of forest belt influence* (No. 2016619724; filed 14.09.2016; published 08.11.2016). Federal State Budgetary Scientific Institution "Federal Scientific Center for Agroecology, Integrated Land Reclama-

tion and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences". EDN: https://elibrary.ru/APFMKA

34. Pugacheva, A. M., Belyaev, A. I., & Trubakova, K. Yu. (2023). *Certificate of state registration of database No. 2023622960 Russian Federation. Zonal agroforestry system of dry steppes of Volgograd Oblast* (No. 2023622402; filed 26.07.2023; published 28.08.2023). Federal State Budgetary Scientific Institution "Federal Scientific Center for Agroecology, Integrated Land Reclamation and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences". EDN: https://elibrary.ru/YGTUTX
35. Ruleva, O. V., & Ovechko, N. N. (2016). *Patent No. 2603903 C1 Russian Federation, IPC A01G 7/00, A01G 1/00. Method for calculating plant biomass in interbelt space* (No. 2015139780/13; filed 18.09.2015; published 10.12.2016). Federal State Budgetary Scientific Institution "Federal Scientific Center for Agroecology, Integrated Land Reclamation and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences" (FSC for Agroecology RAS). EDN: https://elibrary.ru/PLZREF
36. Ruleva, O. V., & Ovechko, N. N. (2017). The role of forest belts in crop yield formation under irrigation. *Ways to Improve the Efficiency of Irrigated Agriculture*, *1*(65), 128–134. EDN: https://elibrary.ru/YIYBFR
37. Ruleva, O. V., & Ovechko, N. N. (2017). *Bioproductivity of irrigated agroforest landscapes: models and forecasts* (115 pp.). Volgograd: Federal Scientific Center for Agroecology, RAS. ISBN: 9785990984127. EDN: https://elibrary.ru/CKQIMN
38. Ryabinina, N. O. (2011). Preservation of reference steppe ecosystems and landscapes in Volgograd Oblast. *Bulletin of Volgograd State University*, *3*, 231–238. EDN: https://elibrary.ru/NWGBCF
39. Sazhin, A. N., Kulik, K. N., & Vasil'ev, Yu. I. (2017). *Weather and climate of Volgograd Oblast* (2nd ed., revised and enlarged; 334 pp.). Volgograd: Federal Research Center for Agroecology, Russian Academy of Sciences. ISBN: 9785900761008. EDN: https://elibrary.ru/WNPTAJ
40. Ruleva, O. V., & Ovechko, N. N. (2017). *Certificate of state registration of computer program No. 2017663290 Russian Federation. Calculation of winter wheat photosynthetic potential over the growing season in a forested agroforest landscape* (No. 2017660190; filed 10.10.2017; published 28.11.2017). Federal State Budgetary Scientific Institution "Federal Scientific Center for Agroecology, Integrated Land Reclamation and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences". EDN: https://elibrary.ru/WJCBHC

41. Kulik, K. N., Barabanov, A. T., Zhdanov, Yu. M., et al. (2017). *Strategy for the development of protective afforestation in Volgograd Oblast for the period up to 2025* (39 pp.). Volgograd: Federal Scientific Center for Agroecology, Integrated Land Reclamation and Protective Afforestation, Russian Academy of Sciences. ISBN: 9785900761961. EDN: https://elibrary.ru/YJFHJZ
42. *Strategy for the development of protective afforestation in the Russian Federation for the period up to 2025* (34 pp.). Volgograd: AllRussia Research Institute of Agroforestry (VNIALMI), 2014.
43. Ruleva, O. V., & Ovechko, N. N. (2018). *Patent No. 2661829 C1 Russian Federation, IPC A01G 7/00, A01G 23/00. Method for assessing yield and productivity of irrigated crops in forestprotected landscapes* (filed 18.01.2017; published 19.07.2018). Federal State Budgetary Scientific Institution "Federal Scientific Center for Agroecology, Integrated Land Reclamation and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences" (FSC for Agroecology RAS). EDN: https://elibrary.ru/ZEJAHB
44. Akbar, G., Ahmad, M., Rafique, S., et al. (1990). Effect of trees on the yield of wheat crop. *Agroforestry Systems*, *11*, 1–10. https://doi.org/10.1007/BF00122808. EDN: https://elibrary.ru/XLMQIW
45. Ameha, N., & Asfaw, Z. (2024). Orientation and root trench effects of *Eucalyptus globulus* boundary plantations on barley yield and soil physicochemical properties in the Gummer district, Central Highlands, Ethiopia. *Agroforestry Systems*, *98*, 1461–1473. https://doi.org/10.1007/s10457-024-01015-5. EDN: https://elibrary.ru/YGWEVG
46. Arkhipova, M. V. (2020). Forest cover changes in the center of East European Plain over the last 150 years. *Contemporary Problems of Ecology*, *13*(7), 825–834. https://doi.org/10.1134/S1995425520070033. EDN: https://elibrary.ru/JJJJRH
47. Chemura, A., Yalew, A. W., & Gornott, C. (2021). Quantifying agroforestry yield buffering potential under climate change in the smallholder maize farming systems of Ethiopia. *Frontiers in Agronomy*, *3*, 609536. https://doi.org/10.3389/fagro.2021.609536. EDN: https://elibrary.ru/LRHRQF
48. Eichhorn, M. P., Paris, P., Herzog, F., Incolli, L. D., Liagre, F., Mantzanas, K., et al. (2006). Silvoarable systems in Europe — past, present and future prospects. *Agroforestry Systems*, *67*, 29–50. https://doi.org/10.1007/s10457-005-1111-7. EDN: https://elibrary.ru/MWIXGC
49. García de Jalón, S., Graves, A., Palma, J. H. N., Williams, A., Upson, M., & Burgess, P. J. (2018). Modelling and valuing the environmental impacts of arable, forestry and agroforestry systems: a case study. *Agroforestry Systems*, *92*,

1059–1073. https://doi.org/10.1007/s10457-017-0128-z. EDN: https://elibrary.ru/IBGMSS

50. Ivezić, V., Yu, Y., & Werf, W. v. d. (2021). Crop yields in European agroforestry systems: a metaanalysis. *Frontiers in Sustainable Food Systems*. https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.606631. EDN: https://elibrary.ru/PFSRCW
51. Kanzler, M., Böhm, C., & Mirck, J., et al. (2019). Microclimate effects on evaporation and winter wheat (Triticum aestivum L.) yield within a temperate agroforestry system. *Agroforestry Systems*, *93*, 1821–1841. https://doi.org/10.1007/s10457-018-0289-4. EDN: https://elibrary.ru/ROXZGS
52. Kachova, V., Hinkov, G., Popov, E., et al. (2018). Agroforestry in Bulgaria: history, presence status and prospects. *Agroforestry Systems*, *92*, 655–665. https://doi.org/10.1007/s10457-016-0029-6. EDN: https://elibrary.ru/OPFEJL
53. Krčmarova, J., & Jelecek, J. (2017). Czech traditional agroforestry: historic accounts and current status. *Agroforestry Systems*, *91*, 1087–1100. https://doi.org/10.1007/s10457-016-9985-0. EDN: https://elibrary.ru/IRLOKX
54. Nerlich, K., GraeffHönninger, S., & Claupein, W. (2013). Agroforestry in Europe: a review of the disappearance of traditional systems and development of modern agroforestry practices, with emphasis on experiences in Germany. *Agroforestry Systems*, *87*, 475–492. https://doi.org/10.1007/s10457-012-9560-2. EDN: https://elibrary.ru/KVVKBN
55. Pugacheva, A. M. (2021). Effects exercised by artificial forest stands on the restoration of secondary virgin lands in agroforest landscapes of dry steppes. *Biology Bulletin*, *48*, 199–206. https://doi.org/10.1134/S1062359021020096. EDN: https://elibrary.ru/TBJFMJ
56. Pugacheva, A. M. (2023). Functionality of zonal agroforestry systems on agricultural land of dry territories. *Forests*, *14*(12), 2364. https://doi.org/10.3390/f14122364. EDN: https://elibrary.ru/AVBZAQ
57. Pretzschel, M., Bohme, G., & Krause, H. (1991). Effects of shelterbelts on crop yield. *Feldwirtschaft*, *32*, 229–231.
58. Tubalov, A. A. (2023). Spatial principles of territories selection for priority development of agroforestry complexes. *Forests*, *14*, 1225. https://doi.org/10.3390/f14061225. EDN: https://elibrary.ru/EHLZWH
59. Thiesmeier, A. (2024). Comparing the economic performance of poplarbased alley cropping systems with arable farming in Brandenburg under varying site conditions and policy scenarios. *Agroforestry Systems*, *98*, 1507–1522. https://doi.org/10.1007/s10457-024-01021-7. EDN: https://elibrary.ru/SBRSBY
60. Sheikh, M. I., & Khalique, A. (1982). Effect of tree belts on the yield of agricultural crops. *Pakistan Journal of Forestry*, *32*, 21–23.

61. Jiang, S., Xiong, K., & Xiao, J. (2022). Structure and stability of agroforestry ecosystems: insights into the improvement of service supply capacity of agroforestry ecosystems under the karst rocky desertification control. *Forests*, *13*, 878. https://doi.org/10.3390/f13060878. EDN: https://elibrary.ru/WCQLEU
62. Quinkenstein, A., Wollecke, J., Böhm, C., Grunewald, H., Freese, D., Schneider, B., et al. (2009). Ecological benefits of the alley cropping agroforestry system in sensitive regions of Europe. *Environmental Science & Policy*, *12*, 1112–1121. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2009.08.008
63. Fisher, J., Zerger, A., Gibbons, P., Stott, J., & Law, B. S. (2010). Tree decline and the future of Australian farmland biodiversity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *107*, 19597–19602. https://doi.org/10.1073/pnas.1008476107
64. Wolz, J. K., & DeLucia, E. H. (2018). Alley cropping: global patterns of species composition and function. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *252*, 61–68. https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.10.005
65. Yukhnovskyi, V., Polishchuk, O., Lobchenko, G., et al. (2021). Aerodynamic properties of windbreaks of various designs formed by thinning in central Ukraine. *Agroforestry Systems*, *95*, 855–865. https://doi.org/10.1007/s10457-020-00503-8. EDN: https://elibrary.ru/BAVVNE
66. Federal State Statistics Service [Electronic resource]. URL: http://www.gks.ru (accessed: 15.02.2024).
67. Rosstat [Electronic resource]. URL: https://rosstat.gov.ru/ (accessed: 05.03.2024).
68. Unified State Register of Soil Resources of Russia [Electronic resource]. URL: https://egrpr.esoil.ru (accessed: 12.03.2024).
69. Legal system "LegalAct" [Electronic resource]. URL: https://legalacts.ru (accessed: 18.03.2024).

ДАННЫЕ ОБ АВТОРЕ

Пугачёва Анна Михайловна, кандидат сельскохозяйственных наук, ученый секретарь

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук»

пр. Университетский, 97, г. Волгоград, 400062, Российская Федерация

pugachevaa@vfanc.ru

DATA ABOUT THE AUTHOR

Anna M. Pugacheva, PhD Sci. Agr., Academic Secretary
Federal Scientific Center of Agroecology, Complex Melioration and Protective Afforestation Russian Academy of Sciences
97, Universitetskiy Ave., 400062 Volgograd, Russian Federation
pugachevaa@vfanc.ru
SPIN-code: 6857-8236
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0852-8056
Researcher ID: 5482-2017
Scopus Author ID: 57194047579

Поступила 05.11.2024
После рецензирования 23.12.2024
Принята 16.01.2025

Received 05.11.2024
Revised 23.12.2024
Accepted 16.01.2025

БИОХИМИЯ, ГЕНЕТИКА И МОЛЕКУЛЯРНАЯ БИОЛОГИЯ

BIOCHEMISTRY, GENETICS AND MOLECULAR BIOLOGY

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-4-1219 **EDN: KUSCMT**
УДК 574/577

Научная статья

ОСОБЕННОСТИ СВОБОДНО-РАДИКАЛЬНОГО СТАТУСА ФОЛЛИКУЛЯРНОЙ ЖИДКОСТИ КОБЫЛ В ПРОЦЕССЕ ФОЛЛИКУЛОГЕНЕЗА

В.В. Калашников, Л.Ф. Лебедева, О.В. Баковецкая, А.А. Терехина, Е.В. Солодова, Ю.В. Абаленихина, А.В. Щулькин

Аннотация

Обоснование. Созревание половых клеток – сложный и многоуровневый процесс. Для повышения эффективности вспомогательных репродуктивных технологий у лошадей необходимо детальное исследование механизмов регуляции фолликулогенеза.

Цель. Прижизненное изучение состояния свободно-радикального статуса и уровня транскрипционных факторов, регулирующих антиоксидантную систему защиты, в фолликулярной жидкости (ФЖ) кобыл позднего переходного периода и сезона половой цикличности.

Материалы и методы. Исследование выполнено на кобылах, помесных тяжеловозных, верховых и вятской пород, 6-12 лет в весеннем переходном периоде и периоде нормальной половой цикличности. Были сформированы 4 группы фолликулов: крупные (≥31мм) фолликулы в весенний переходный период, без признаков лютеинизации (группа 1) и с признаками лютеинизации (группа 2); крупные эстральные фолликулы (>35 мм) в овуляторный период без гормональной обработки (группа 3) и с гормональной обработкой (группа 4). Фотометрическими методами в ФЖ определяли – концентрация продуктов перекисного окисления липидов – ТБК-реактивных продуктов и продуктов

окисления белков – карбонильных производных белков; активность антиоксидантных ферментов – супероксиддисмутазы и глутатионпероксидазы и уровня эндогенного антиоксидантна глутатиона. Методом вестер-блот анализировали относительное количество белков Nrf2, HIF-1a, VEGF и NfkB.

Результаты. В фолликулах группы 3 концентрация ТБК-реактивных продуктов и карбонильных производных белков существенно увеличивалась и превышала значения групп 1, 2 и 4. Содержание небелковых SH-групп, достигало максимального уровня в ФЖ в группе 4, превышая показатели 1 и 3 группы. Активность супероксиддисмутазы и глутатионпероксидазы достоверно увеличивались в 4 группе относительно группы 1. Уровень Nrf2 повышался в ФЖ 4 группы, HIF1α – 2 и 3 группах, NfkB и VEGFA – во 2 группе.

Заключение. Рост фолликула и подготовка его к овуляции у циклирующих кобыл в летний период сопровождается развитием окислительного стресса, что приводит к активации редоксчувствительного фактора Nrf2, с последующим повышением активности антиоксидантных ферментов супероксиддисмутазы и глутатионпероксидазы и уровня эндогенного антиоксидантна глутатиона. Для крупных фолликулов с признаками лютеинизации в весенний переходный периода в ФЖ характерно повышение уровня VEGF и NfkB, что может отражать развитие локальной гипоксии и воспаления и обуславливать развитие фолликула по пути лютеинизации без овуляции.

Ключевые слова: кобылы; фолликулогенез; окислительный стресс; Nrf2; HIF-1a; VEGF; NfkB

Для цитирования. Калашников, В. В., Лебедева, Л. Ф., Баковецкая, О. В., Терехина, А. А., Солодова, Е. В., Абаленихина, Ю. В., & Щулькин, А. В. (2025). Особенности свободно-радикального статуса фолликулярной жидкости кобыл в процессе фолликулогенеза. Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture, 17(4), 155-181. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-4-1219

Original article

FEATURES OF THE FREE RADICAL STATUS OF THE FOLLICULAR FLUID OF MARES IN THE PROCESS OF FOLLICULOGENESIS

V.V. Kalashnikov, L.F. Lebedev, O.V. Bakovetskaya, A.A. Terekhina, E.V. Solodova, Yu.V. Abalenikhina, A.V. Shchulkin

Abstract

Background. The maturation of germ cells is a complex and multilevel process. To increase the effectiveness of assisted reproductive technologies in

horses, a detailed study of the mechanisms of regulation of folliculogenesis is necessary.

Purpose. A lifetime study of the state of free radical status and the level of transcription factors regulating the antioxidant defense system in the follicular fluid (FF) of mares of the late transition period and the season of sexual cyclicity.

Materials and methods. The study was performed on mares, crossbreeds of heavy-duty, riding and Vyatka breeds, 6-12 years old in the spring transition period and the period of normal sexual cyclicity. 4 follicle groups were formed: large (≥31mm) follicles in the spring transition period, without signs of luteinization (group 1) and with signs of luteinization (group 2); large estrous follicles (>35 mm) in the ovulatory period without hormonal treatment (group 3) and with hormonal treatment (group 4). Photometric methods were used to determine the concentration of lipid peroxidation products – TBK-reactive products and protein oxidation products – carbonyl derivatives of proteins; the activity of antioxidant enzymes – superoxide dismutase and glutathione peroxidase and the level of endogenous antioxidant glutathione. The relative amounts of Nrf2, HIF-1a, VEGF and NFkB proteins were analyzed using the wester blot method.

Results. In the follicles of group 3, the concentration of TBK-reactive products and carbonyl derivatives of proteins increased significantly and exceeded the values of groups 1, 2 and 4. The content of non-protein SH groups reached a maximum level in the SH-group 4, exceeding the indicators of groups 1 and 3. The activity of superoxide dismutase and glutathione peroxidase significantly increased in group 4 relative to group 1. The level of Nrf2 increased in the SH-group 4, HIF1a – 2 and 3 groups, NFkB and VEGFA – in group 2.

Conclusion. The growth of the follicle and its preparation for ovulation in cycling mares in the summer is accompanied by the development of oxidative stress, which leads to the activation of the redox-sensitive factor Nrf2, followed by an increase in the activity of antioxidant enzymes superoxide dismutase and glutathione peroxidase and the level of endogenous antioxidant glutathione. For large follicles with signs of luteinization in the spring transition period, an increase in the level of VEGF and NFkB is characteristic in the FF, which may reflect the development of local hypoxia and inflammation and cause the development of the follicle along the path of luteinization without ovulation.

Keywords: mares; folliculogenesis; oxidative stress; Nrf2; HIF-1a; VEGF; NfkB

For citation. Kalashnikov, V. V., Lebedev, L. F., Bakovetskaya, O. V., Terekhina, A. A., Solodova, E. V., Abalenikhina, Yu. V., & Shchulkin, A. V. (2025). Features

of the free radical status of the follicular fluid of mares in the process of folliculogenesis. Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture, 17(4), 155-181. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-4-1219

Введение

В последние годы результаты применения вспомогательных репродуктивных технологий у различных видов млекопитающих значительно улучшились, однако их эффективность у лошадей остается низкой. Возможная причина данной тенденции может заключаться в особенностях физиологии размножения кобыл, таких как: сезонность размножения (физиологический сезон размножения или овуляторный сезон кобылы длится в северном полушарии с ранней весны до позднего лета), продолжительный эструс (охота), длительный период плодоношения (11 месяцев), сравнительно позднее наступление половой зрелости (в 1,5-2 года), а также в отсутствии детальной информации о физиологических механизмах, контролирующих развитие фолликулов, созревание ооцитов и последующее оплодотворение [17]. Нормальный половой цикл у кобыл длится в среднем 21-23 дня, из них, 5-7 дней приходится на охоту (эструс), которая завершается овуляцией, и 15-17 дней – на диэструс (половой покой). В сезон размножения в половом цикле у кобыл из фолликулярной волны в яичнике выделяется и доходит до овуляции один, редко два лидирующих фолликула, подавляющих рост конкурентных, менее крупных фолликулов. В зимние месяцы (декабрь-февраль) репродуктивная система кобыл погружается в «спячку» - анэструс, когда растущие фолликулы и желтые тела в яичниках отсутствуют, а матка бледная, сухая и расслабленная. Между этими двумя сезонными фазами есть два переходных периода – весенний и осенний. По мере удлинения светового дня весной в яичниках пробуждается фолликулярная активность. Однако 1-2 первые фолликулярные волны, как правило, не заканчиваются овуляцией. Растущие фолликулы либо претерпевают атрезию, либо лютеинизируются, превращаясь в желтые тела без овуляции. То есть яйцеклетки из таких фолликулов не выходят, и оплодотворение невозможно. Предугадать судьбу созревающих фолликулов в яичниках кобыл в весенний переходный период невозможно, поэтому часто труды репродуктолога оказываются без результата, и приходится в следующем цикле ждать овуляцию, чтобы плодотворно осеменить кобылу. Осенью наличие крупных лютеинизированных фолликулов в яичниках кобыл («осенние») свидетельствует об угасании половой активности и приближении фазы анэструса [4].

Созревание половых клеток – сложный и многоуровневый процесс, регуляция которого зависит от гонадотропных и стероидных гомонов, различных факторов роста, цитокинов, а также содержания необходимых метаболитов [19].

У млекопитающих оогенез происходит в фолликулах яичников, ооцит созревает в окружении фолликулярной жидкости. Фолликулярная жидкость (ФЖ) – это сложная внеклеточная жидкость, которая является производной плазмы крови и секретов, синтезируемых в стенке фолликула. Она поддерживает взаимосвязь развивающейся яйцеклетки с клетками кумулюса, гранулезы и теки. Поэтому по уровню различных веществ в ФЖ можно косвенно судить об условиях созревания ооцита, его качестве, фертильности и возможных нарушениях фолликулогенеза [7; 9].

С другой стороны актуальной проблемой современной эмбриологии является подбор оптимальной среды для созревания ооцитов лошадей in vitro. Среди всех незрелых ооцитов, получаемых методом прижизненной аспирации из фолликулов (Ovum PickUp - OPU) и используемых для оплодотворения методом интрацитоплазматической инъекции сперматозоида в яйцеклетку (ICSI), в лучшем случае примерно 10% дают успешную беременность и выжеребку [10]. В то же время, когда созревшие in vivo ооциты лошадей переносятся в яйцеводы живых кобыл для получения потомства, вероятность беременности возрастает до 75% [14]. В связи с этим, актуально исследование состава ФЖ, обуславливающего те или иные исходы развития фолликула.

Свободно-радикальные процессы имеют универсальный характер, участвуют в механизме запрограммированной гибели клеток, синтезе простагландинов и лейкотриенов, обмене катехоламинов и стероидных гормонов, передвижении электронов в цепи дыхательных ферментов, обеспечении защиты от патологического деления клеток, регуляции проницаемости и транспорта веществ через мембраны [13; 20]. Для обеспечения защиты клеток от воздействия свободных радикалов и продуктов их повреждения эволюционно выработалась система антиоксидантной защиты. В норме поддерживается баланс между образованием активных форм кислорода (АФК) и их нейтрализацией антиоксидантной системой [1; 24].

В ряде исследований было показано, что в процессе фолликулогенеза, а также при его нарушении может активироваться продукция свободных радикалов [19; 24]. Нарушение окислительно-восстановительного гомеостаза может оказывать влияние на эндометрий, фолликулярный аппарат яичников и фаллопиевы трубы, процессы овуляции, лютеинизации и сте-

роидогенез [1]. Эти процессы у лошадей малоизучены, данные по анализу ФЖ ограничены и получены в основном, от животных посмертно [7].

Для максимальной эффективности вспомогательных репродуктивных технологий необходима точная система оценки качества и жизнеспособности формирующихся фолликулов в яичниках, а также знание факторов, которые определяют путь развития фолликула (овуляция, атрезия, лютеинизация без овуляции). Поэтому актуальной задачей является поиск биомаркеров, которые позволили бы прижизненно оценивать состояние фолликулов и репродуктивный потенциал особи.

Целью настоящего исследования было прижизненное изучение состояния свободно-радикального статуса и уровня транскрипционных факторов, регулирующих антиоксидантную систему защиты, в фолликулярной жидкости кобыл позднего переходного периода и сезона половой цикличности.

Экспериментальная часть

Исследование выполнено на 6 кобылах помесных тяжеловозных, верховых и вятской пород, в возрасте от 6 до 12 лет и было одобрено биоэтической комиссией созданной при ФГБНУ ВНИИ коневодства (Протокол №8-23 от 28.11.2023 г.)

Все кобылы принадлежали экспериментальной конюшне ФГБНУ ВНИИ коневодства. Содержание и кормление животных соответствовало принятым зоотехническим и ветеринарным нормам.

Эксперименты по пунктированию ФЖ проводили в двух сезонах половой активности кобыл, соответствующих весеннему переходному периоду (П) с ановуляторными циклами, и овуляторной фазе (О) с нормальной половой цикличностью и овуляцией. На основе ультразвукового исследования яичников определяли количество и размер фолликулов, выбирая для опытов крупные фолликулы (≥31 и ≥35мм в диаметре для (П) и (О) периодов, соответственно) с учетом эхоструктуры внутрифолликулярной жидкости. В весенний переходный период крупные фолликулы с гомогенно-черной экоструктурой считали потенциально способными как дойти до овуляции, так и лютеинизироваться (группа 1). Первыми признаками лютеинизации считали появление эхогенных вкраплений в полости фолликула (группа 2). В овуляторный период крупные фолликулы пунктировали в фазе активного эструса, ближе к овуляции с опорой на сопутствующие физиологические признаки (наличие отека матки, форма и консистенция зрелого фолликула) (группа 3). Отдельной группе кобыл в активном половом сезоне применяли гормональную стимуляцию овуляции

в виде внутримышечной инъекции 50 мкг препарата «Сурфагон» (аналог гонадотропного рилизинг гормона (ГнРГ), ЗАО Мосагроген, Москва), и проводили пункцию фолликулов через 24 часа после инъекции, то есть в предовуляторной фазе (группа 4).

Перед процедурой OPU (англ. Ovum PickUp; прижизненное извлечение ооцитов из яичников кобыл) проводили седацию животных детомидина гидрохлоридом (препарат «Домоседан», Zoetis-Pfizer, США) в дозе 0.2-0.5 мг внутривенно, добавляя препарат по мере необходимости в несколько приемов в течение всей процедуры. После первой инъекции домоседана кобылам делали эпидуральную анестезию 2% лидокаином (5-7 мл). За 15 минут до начала процедуры вводили флюнексинмеглумин («Norbrook Laboratories Limited», Великобритания) (300-500 мг) и антибиотик ветбицин-3 (ОАО «Синтез», Россия) (10 000-15 000 ЕД на 1 кг массы животного).

ФЖ из яичников кобыл извлекали методом трансвагинальной аспирации под ультразвуковым контролем (OPU) с помощью вакуумного насоса COOK Medical K-MAR-5200 (WILLIAM A. COOK AUSTRALIA PTY. LTD.) и модифицированного эндовагинального зонда с микроконвексным датчиком в комплектации к ультразвуковому сканеру EXAGO («ECM», Франция). Через направляющую, встроенную в зонд, вставляли двухпросветную иглу калибра 12G, длиной 65 см в полость фолликула и отсасывали ФЖ. Иглы, проводящие системы и приемные сосуды меняли для каждого фолликула.

Таким образом, были сформированы 4 группы фолликулов:

1 группа – крупные (≥31мм) фолликулы в весенний переходный период, без признаков лютеинизации (П);

2 группа – крупные (≥31мм) фолликулы в весенний переходный с признаками лютеинизации (Пл);

3 группа – крупные эстральные фолликулы (>35 мм) в овуляторный период без гормональной обработки (Оэ);

4 группа – крупные эстральные фолликулы (>35 мм) в овуляторный период после гормональной обработки (Ог).

Всем кобылам выполняли ультразвуковое исследование с помощью УЗИ-сканера Honda HS 2000 (Япония) с ректальным ветеринарным датчиком HLV375M.

Одни и те же кобылы были задействованы в опытах в двух половых сезонах (переходном и овуляторном), от одной и той же кобылы была получена ФЖ из фолликулов разных групп. Итого, для изучения выраженности окислительного стресса в каждую группу вошло по 4 образца ФЖ

из разных фолликулов (n=4 в каждой группе), для оценки уровня транскрипционных факторов по 3 образца (n=3 в каждой группе).

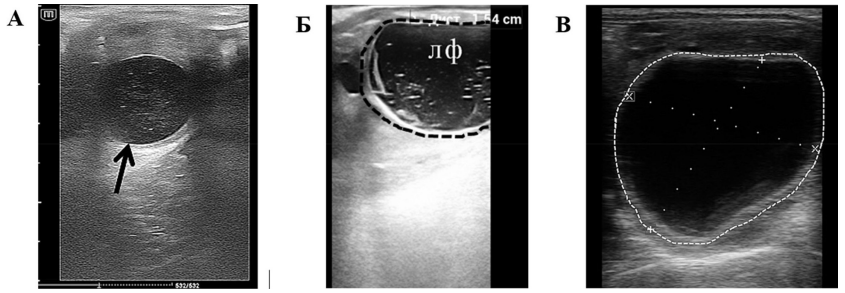


Рис. 1. Результаты ультразвукового исследования: А – фолликул в начальной стадии лютенизации; Б – лютенизирующийся фолликул; В – крупный фолликул.

Полученную ФЖ центрифугировали 20 минут при 3000 об/мин, аликвотили в 1,5 мл пробирки типа эппендорф, замораживали при -25^{0}С и хранили до выполнения анализа. Свободно-радикальный статус оценивали по следующим показателям: концентрации продуктов реагирующих с тиобарбитуровой кислотой (ТБК-реактивные продукты), карбонильных производных белков, небелковых SH-групп, активности антиоксидантных ферментов глутатионпероксидазы и супероксиддисмутазы.

Концентрацию ТБК-реактивных продуктов анализировали с помощью коммерческого набора («Агат», Россия). Метод основан на способности продуктов ПОЛ образовывать с тиобарбитуровой кислотой (ТБК) окрашенный комплекс, экстрагируемый бутанолом [18]. Результаты выражали в нмоль/мг белка.

Концентрацию карбонильных производных белков оценивали с помощью коммерческого набора – ProteinCarbonyl Content Assay Kit («SigmaAldrich», США) по реакции взаимодействия с 2,4-динитрофенилгидразином с образованием 2,4-динитрофенилгидразонов, которые регистрируют при длине волны 375 нм [27]. Концентрацию карбонильных производных белков выражали в нмоль/мг белка.

Уровень белковых и небелковых серосодержащих соединений оценивали по методу Эллмана. Уровень GSH определяли по реакции восстановления дисульфида 5,5-дитиобис(2-нитробензоата) («Serva», Германия) с образованием эквивалентного количества окрашенных жёлтых анионов 2-нитро-5-тиобензоата, имеющих максимум поглощения при 412 нм [8]. Для определения содержания низкомолекулярных SH-групп пробу пред-

варительно смешивали с охлажденной 5% трихлоруксусной кислотой («Химмед», Россия), инкубировали на льду 15 мин, затем центрифугировали при 11000 g (CM-50, «Eppendorf», Германия) 5 мин при 4°C. Полученный супернатант нейтрализовали с помощью 1% NaOH и использовали для определения низкомолекулярных SH-групп по реакции с DTNB. Концентрацию SH-групп выражали в мкмоль/мг белка.

Активность глутатионпероксидазы анализировали по уменьшению оптической плотности $НАДФН_2$ в сопряженных реакциях нейтрализации гидроперекиси трет-бутил под действием глутатионпероксидазы и восстановленного глутатиона с последующим его восстановлением под действием глутатионредуктазы и $НАФН_2$ [3], и выражали в нмоль НАДФН/мин/белка.

Активность супероксиддисмутазы (СОД) анализировали по степени торможении реакции окисления кверцетина, фиксируемое по изменению оптической плотности реакционной смеси при длине волны λ=406 нм [2]. Полученные данные выражали в УЕ/мл.

Результаты биохимических анализов пересчитывали на количество белка, которое анализировали методом Бредфорда (PierceCoomassiePlus (Bradford) AssayKit, «ThermoFisher», США) [6].

Анализ уровня транскрипционных факторов в ФЖ методом вестерн-блот.

Для анализа 20 мкг белков подвергали электрофорезу с использованием TGX Stain-Free FastCastAcrylamide Kit («Bio-Rad») в буферной системе Laemmli («BioRad»). Перед загрузкой образцы обрабатывали в соответствии с протоколом Bio-Rad. Их смешивали с буфером для образцов Laemmli («Bio-Rad»), содержащем 2,5% 2-меркаптоэтанола («Bio-Rad») в соотношении 1:3, инкубировали 5 мин при температуре 70°C. Условия электрофореза - 100 В, 90 мин.

Перенос белков с геля на мембрану осуществлялся полусухим методом с помощью TransBlotTurbo («BioRad», США). Белки на мембране блокировали 1% раствором EveryBlotBlockingBuffer (Bio-Rad, США), содержащим 0,1% Tween в течение 30 мин при комнатной температуре.

Для анализа транскрипционных факторов использовали следующие первичные кроличьи поликлональные антитела в разведении 1:500:

Nrf2 – транскрипционный фактор, регулирующий антиоксидантный ответ клеток (AF0639 Nrf2 Antibody, Affinity, Китай);

HIF-1α – фактор индуцируемый гипоксией, субъединица 1α (AF1009 HIF1AAntibody, Affinity, Китай);

NFkB p65 – транскрипционный фактор, участвующий в воспалении и антиоксидантном ответе (AF5006 NF-kB p65 Antibody, Affinity, Китай), антитела против мономера p65;

VEGFA – фактор роста эндотелия сосудов (AF5131 VEGFA Antibody, Affinity, Китай), антитела против всех изоформ.

Визуализацию первичных антител осуществляли с использованием вторичных козлиных антител (Goatanti-RabbitIgG (H+L) Cross-AdsorbedSecondaryAntibody, HRP, «Invitrogen», США) в разведении 1:4000 и инкубацией в течение 1 ч при комнатной температуре.

Хемилюминесценцию фиксировали с помощью ChemiDocXRS+ («Bio-Rad», США). Интенсивность полученных полос (бэндов) анализировали денситометрически с помощью программного обеспечения ImageLab (Bio-Rad, США).

Молекулярная масса анализируемых белков была подтверждена путем сравнения с маркерами молекулярной массы (Precision plusproteinstandards Dual Color, Bio-Rad, США).

Содержание белков оценивали относительно глицеральдегид-3-фосфатдегидрогеназы (GAPDH, англ.: glyceraldehyde 3-phosphate dehydrogenase, первичные антитела GAPDH Loading Control MonoclonalAntibody (GA1R), DyLight 68 («Invitrogen», США), разведение 1:1000, вторичные кроличьи антитела - Rabbit-anti-Mouse IgG (H+L) SecondaryAntibody, HRP (Invitrogen, США), разведение 1:4000).

Анализ результатов производили с помощью программы GraphPadPrism-Version 9.5.0. Для оценки статистической значимости различий использовали дисперсионный анализ ANOVA, попарные сравнения оценивали по критерию Тьюки. Статистически значимыми считали различия при $p<0.05$.

Результаты исследования

Содержание продуктов перекисного окисления липидов – ТБК-реактивных продуктов находилось на одном уровне в ФЖ в группах 1 (П), 2 (Пл) и 4 (Ог). В фолликулах группы 3 (Оэ) концентрация ТБК-реактивных продуктов существенно увеличивалась и превышала значения других групп – 1 группы на 205,0% ($p<0,01$), 2 группу на 215,2% ($p<0,01$), 4 группу на 159,5% ($p<0,01$) (табл.).

Аналогичная картина наблюдалась и при оценке содержание продуктов окисления белков – их карбонильных производных. Данный показатель находился на одном уровне у животных 1(П), 2 (Пл) и 4 (Ог) групп, и достоверно увеличивался в 3 группе (Оэ) – на 71,3% ($p<0,001$), 59,3%

(p<0,001) и 45,8% (p<0,01) превышая показатели 1, 2 и 4 групп соответственно (табл.).

Концентрация белковых SH-групп в ФЖ изучаемых групп животных статистически значимо между собой не различалась (табл.).

В то же время содержание небелковых SH-групп, основным представителем которых является глутатион, достигало максимального уровня в ФЖ в группе 4 (Ог), превышая показатели 3 группы (Оэ) на 58,3% (p<0,05).

Минимальная активность СОД и глутатионпероксидазы отмечалась в ФЖ 3 группы (Оэ) (статистически значимо значения не отличаясь от показателей в 1 (П) и 2 (Пл) группах) и достоверно увеличивались в 4 группе (Ог) на 52,3% (p<0,05) и 28,6% (p<0,05) соответственно (табл.).

Таблица.

Свободно-радикальный статус фолликулярной жидкости кобыл в процессе фолликулогенеза (среднее ±SD).

Показатель	Группы			
	1 группа – П (n=4)	2 группа – Пл (n=4)	3 группа – Оэ (n=4)	4 группа – Ог (n=4)
Концентрация ТБК-реактивных продуктов, нмоль/мг белка	0,23± 0,04**	0,22± 0,01**	0,70± 0,25	0,27± 0,08**
Концентрация карбонильных производных белков, нмоль/мг белка	1,00± 0,08***	1,07± 0,07***	1,71± 0,30	1,17± 0,05**
Концентрация белковых SH-групп, мкмоль/мг белка	8,97± 2,47	9,56± 1,24	8,53± 2,78	10,98± 0,84
Концентрация небелковые SH-групп, мкмоль/мг белка	1,58± 0,37	1,54± 0,32	1,32± 0,25	2,09± 0,30*
Активность супероксид-дисмутазы, УЕ/мл	3,61± 0,65	3,11± 0,81	2,66± 0,44	4,05± 0,55*
Активность глутатионпероксидаза, нмоль НАДФН/мин/белка	35,17± 3,95	35,31± 3,48	30,11± 3,37	38,72± 3,48*

Примечание:

* - p<0,05; ** - p<0,01; *** - p<0,001 – статистически значимые различия с показателями 3 группы (Оэ)

При проведении вестерн-блот анализа сравнение изучаемых показателей осуществляли со значениями уровня транскрипционных факторов в ФЖ 1 группы (П).

Максимальный уровень транскрипционного фактора Nrf2 отмечался в ФЖ 4 группы (Ог), который превосходил показатели ФЖ 1 (П) и 2 (Пл) групп на 104,3% (p<001) и на 96,1% достоверно не отличался от значений 3(Оэ) группы (рис. 2).

Относительное количество Nrf2 в ФЖ 3 группы (Оэ) также превосходило показатели 1 (П) и 2 (Пл) групп на 70,0% (p<0,05) и 63,1% (p<0,05) соответственно.

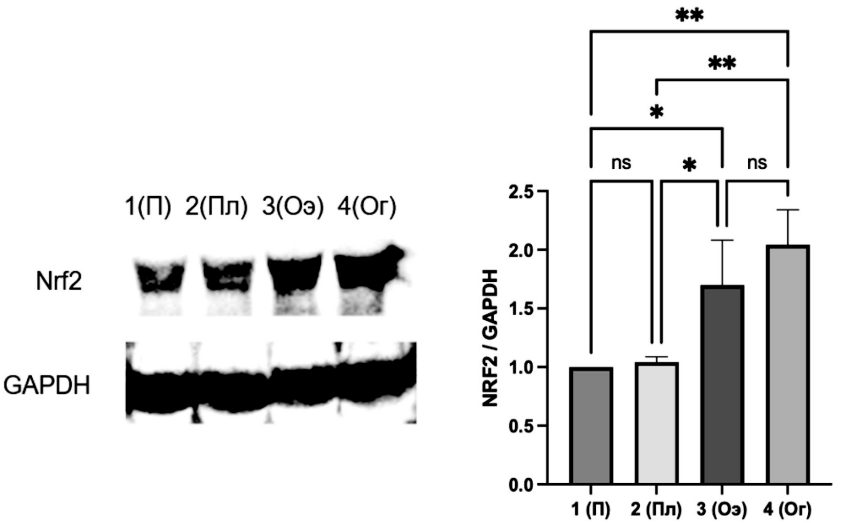


Рис. 2. Относительное количество Nrf2 в фолликулярной жидкости кобыл
Примечание: * - p<0,05, ** - p<0,01 – статистически значимые отличия; ns – нет статистически значимых различий по сравнению с соответствующей группой сравнения.

Уровень HIF1α в ФЖ по сравнению с 1 группой (П) повышал во 2 (Пл) и 3 (Оэ) группах на 80,4% (p<0,05) и 61,0% (p<0,05) соответственно и достоверно не изменялся в 4 группе (Ог) (рис. 3).

Уровень транскрипционного фактора NfkB в фолликулярной жидкости кобыл был на одном уровне в группах 1(П) и 4 (Ог), в группе 2 (Пл) превышал значения 1 группы на 24,6% (p<0,05), а в группе 3 (Оэ) был их меньше на 24,2% (p<0,05) (рис. 4).

Уровень транскрипционного фактора VEGFA в ФЖ кобыл был на одном уровне в группах 1(П), 3(Оэ) и 4(Ог), и повышался во 2 группе (Пл), превышая значения 1 группы на 54,7% (p<0,01).

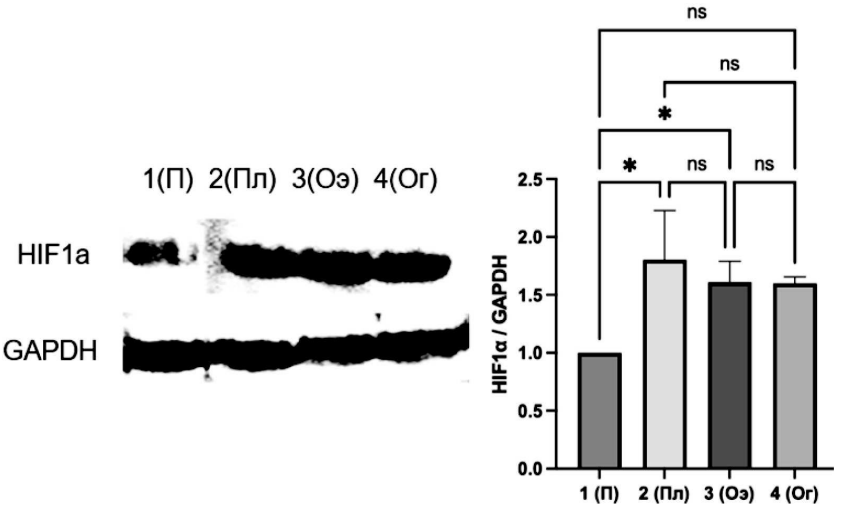


Рис. 3. Относительное количество HIF1a в фолликулярной жидкости кобыл.
Примечание: * - p<0,05 статистически значимые отличия и ns – нет статистически значимых различий по сравнению с соответствующей группой.

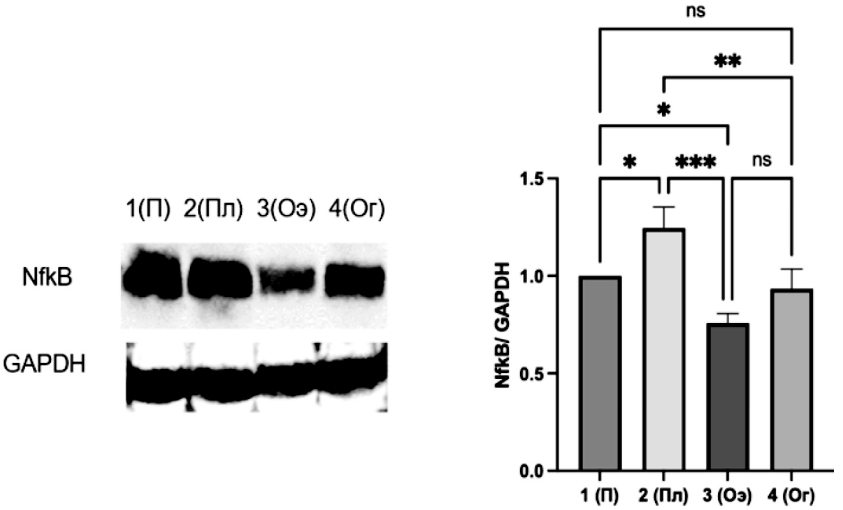


Рис. 4. Относительное количество NfkB в фолликулярной жидкости кобыл
Примечание: * - p<0,05, ** - p<0,01, *** - p<0,01 – статистически значимые отличия, ns – нет статистически значимых различий по сравнению с соответствующей группой.

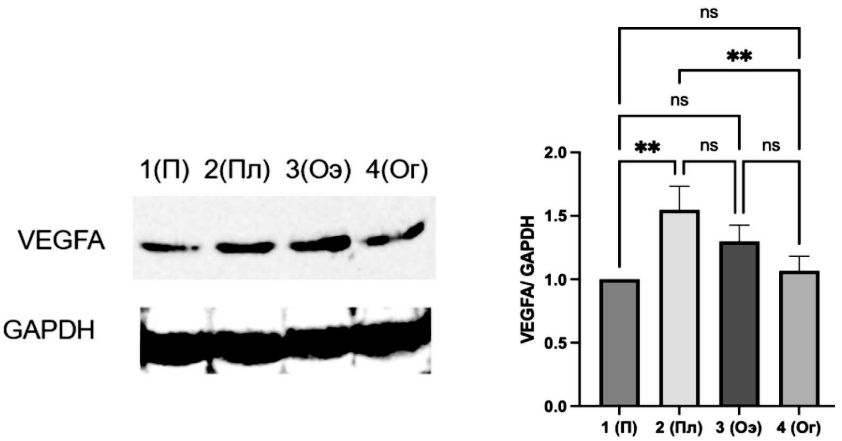


Рис. 5. Относительное количество VEGFA в фолликулярной жидкости кобыл
Примечание: ** - p<0,01 – статистически значимые отличия и ns – нет статистически значимых различий по сравнению с соответствующей группой.

Обсуждение результатов

Фолликулогенез у кобыл включает в себя следующие этапы: фолликулярный покой, активация, рост, ремоделирование ткани стромы яичника антральными фолликулами, миграция преовуляторных фолликулов к овуляционной ямке, овуляция, лютеинизация и атрезия. В целом, вышеупомянутые события могут привести к гетерогенной и широко варьирующей популяции фолликулов, как между особями, так и в яичниках одной кобылы [15].

Особенностью физиологии размножения кобыл является то, что в зимний период они находятся в состоянии анэструса, весной начинается переходный период, а летом устанавливается регулярный эстральный цикл.

На протяжении среднего и позднего переходного периода происходит образование и развитие нескольких фолликулярных волн с 10-12 дневными промежутками [26]. При этом концентрация эстрадиола на протяжении большей части всего переходного периода в периферической плазме остаётся низкой и поднимается всего за несколько дней до первой овуляции в году. Это связано с недостаточным количеством стероидобразующих ферментов в ткани фолликулов первой и второй волны. Хотя, в переходный период фолликулы и достигают 30 мм в диаметре, растут они значительно медленнее овуляторных и являются менее васкуляризированными. Уровень лютеинизирующего гормона остаётся низким на протяжении боль-

шей части переходного периода. Таким образом, развитие фолликулов происходит в среде, богатой фолликулостимулирующим гормоно, но бедной лютеинизирующим. Это приводит к повторному развитию крупных ановуляторных стероидогенно некомпетентных фолликулов и обуславливает длительные беспорядочные периоды проявления охоты [25].

В рамках настоящего исследования прижизненно анализировалось состояние свободно-радикального статуса и уровня транскрипционных факторов, регулирующих антиоксидантную систему защиты, в ФЖ кобыл весеннего переходного периода и сезона полноценной (с овуляцией) половой цикличности.

Созревание фолликула и подготовка его к овуляции у циклирующих кобыл в активный половой период сопровождалось развитием окислительного стресса, о чем свидетельствует повышение содержания продуктов перекисного окисления липидов – ТБК-реактивных продуктов и продуктов окисления белков – карбонильных производных белков увеличивалось в ФЖ. При этом активность антиоксидантных ферментов супероксиддисмутазы и глутатионпероксидазы находились на минимальном уровне, по сравнению с показателями ФЖ кобыл, находящихся в других периодах половой цикличности. Данные изменения могут носить физиологическое значение и направлены на повреждение оболочки и дальнейший выход ооцита из фолликула во время овуляции.

Гормональная обработка кобыл (стимуляция овуляции) сопровождалась снижением выраженности окислительного стресса, что проявлялось снижением уровня ТБК-реактивных продуктов и карбонильных производных белков и повышением активности антиоксидантных ферментов. При этом увеличивался уровень редокс-чувствительного транскрипционного фактора Nrf2 (относительное количество начинало увеличиваться уже в овуляторный период).

Nrf2 – редокс-чувствительный транскрипционный фактор, который реагирует на изменение соотношения восстановленных и окисленных SH-групп в белках. Его экспрессия повышается при развитии ОС и направлена на защиту клетки от воздействия свободных радикалов за счет повышения экспрессии ферментов антиоксидантной защиты, шаперонов, а также ферментов репарации/утилизации поврежденных макромолекул [5]. В условиях нормы данный транскрипционный фактор находится в комплексе с белком-репрессором Keap1, который, с одной стороны, способствует убиквитированию и протеосомальной деградации Nrf2, а с другой – предотвращает его проникновение из цитоплазмы в ядро. После активации комплекс

Keap1-Nrf2 диссоциирует, и Nrf2 транслоцируется в ядро, где связывается с элементом антиоксидантного ответа (англ.: antioxidant-response elements, ARE) и активирует транскрипцию защитных ферментов [16].

Таким образом, полученные данные свидетельствуют о том, что подготовка к овуляции фолликула у циклирующих кобыл в активном половом периоде сопровождается развитием окислительного стресса, что вызывает активацию редокс-чувствиельного фактора Nrf2, с последующим повышением активности атиоксидантных ферментов СОД и глутатионпероксидазы и уровня эндогенного антиоксидантна глутатиона, что подавляет окислительный стресс в предовуляторный период.

У кобыл в переходный (весенний) период в крупных фолликулах (группа 1П) и фолликулах с признаками лютеинизации (группа 2(Пл) изучаемые показатели выраженности окислительного стресса и состояния антиоксидантной системы достоверно не изменялись и находились на низких уровнях.

В то же время в ФЖ фолликулов весеннего переходного периода (весна) с признаками лютеинизации (группа 2Пл) отмечалось повышение уровня транскрипционных факторов HIF1a, VEGFA и NfkB. Уровень HIF1a повышался также в ФЖ эстральных фолликулов в нормальном цикле (группа 3(Оэ)), в то время как увеличение VEGFA и NfkB было специфично только для фолликулов с признаками лютеинизации (группа 2Пл).

HIF1 – является одним из основных транскрипционных факторов, участвующих в формировании резистентности клеток к недостатку кислорода. Он состоит из двух субъединиц – HIF-1α и HIF-1β. β-субъединица экспрессируется постоянно, α же субъединица регулируется кислородом. При нормальной концентрации кислорода происходит разрушение молекулы HIF-1α. При гипоксии белковая молекула HIF-1α остается стабильной и накапливается. Субъединицы HIF-1α и HIF-1β объединяются. Образовавшийся в результате этого транскрипционный белок HIF-1 в ядре клетки связывается с особыми последовательностями ДНК в генах, экспрессия которых индуцируется гипоксией.

Известно, что увеличение уровня HIF-1 приводит к повышению экспрессии генов, которые обеспечивают адаптацию клетки к гипоксии и стимулируют эритропоэз (гены эритропоэтина), ангиогенез (ген фактора роста эндотелия сосудов VEGF), ферменты гликолиза (ген альдолазы, лактатдегидрогеназы, фосфофруктокиназы, пируваткиназы и пр.) [22].

Развитие фолликулов сопровождается ремоделированием сосудистой системы, пролиферацией и дифференцировкой клеток, образованием про-

света фолликула, так что локальное микроокружение, в котором развивается ооцит является гипоксическим [19]. Из-за бессосудистой структуры фолликула яичника пролиферация гранулезных клеток и развитие фолликула происходят в условиях гипоксии [23].

Выявленные максимальные уровни HIF-1α были обнаружены в крупных лютеинезирующихся фолликулах (группа 2Пл), то есть как раз в тех условиях, когда клетки максимально подвержены гипоксии.

В эукариотических клетках NF-kB является важным фактором ядерной транскрипции, который регулирует экспрессию многих цитокинов, включая провоспалительные цитокины, и может активироваться при развитии окислительного стресса [12].

В норме NF-kB связан с его ингибирующим белком I*k*B и секвестрирован в цитоплазме. После активации киназа I*k*B (IKK) фосфорилирует I*k*B, что в дальнейшем вызывает его деградацию, опосредованную протеасомами. После чего NF-kB транспортируется в ядро из цитоплазмы [11]. В ядре NF-kB связывается со специфической последовательностью нуклеотидов, активируя соответствующие промоторы и индуцируя экспрессию воспалительных цитокинов, включая ИЛ-1, ИЛ-6, ЦОГ-2 и ФНО-1а [21]. Эти факты позволяют предположить, что NF-kB играет важную роль в регуляции воспаления.

Выявленное селективное увеличение NfkB в ФЖ лютеинизирующихся фолликулов может свидетельствовать о том, что развитие воспаления запускает процесс лютеинизации в неовулирующих фолликулах на фоне развития окислительного стресса.

Заключение

В ходе прижизненного исследования было установлено, что рост фолликула и подготовка его к овуляции у циклирующих кобыл в летний период сопровождается развитием окислительного стресса, о чем свидетельствует повышение содержания продуктов перекисного окисления липидов – ТБК-реактивных продуктов и продуктов окисления белков – карбонильных производных белков в ФЖ. Данные изменения приводят к активации редокс-чувствиельного фактора Nrf2, с последующим повышением активности атиоксидантных ферментов супероксиддисмутазы и глутатионпероксидазы и уровня эндогенного антиоксидантна глутатиона, что подавляет окислительный стресс в период овуляции.

Для крупных фолликулов с признаками лютеинизации в весенний переходный периода в ФЖ характерно повышение уровня VEGF и NfkB, что

может отражать развитие локальной гипоксии и воспаления и обуславливать развитие фолликула по пути лютеинизации без овуляции.

Результаты проведенных исследований имеют ценность с точки зрения теоретического обоснования выбора ФЖ для использования в циклах вспомогательных репродуктивных технологий в качестве добавки к средам и изучения биологических основ фолликулогенеза и овуляции в прогностических целях.

Информация о спонсорстве. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 23-16-00226).

Сокращения:
АФК – активные формы кислорода;
СОД – супероксиддисмутаза;
ТБК – тиобарбитуровая кислота;
ФЖ – фолликулярная жидкость

Список литературы

1. Березина, Д. А., Кудрявцева, Е. В., & Гаврилов, И. В. (2023). Роль окислительного стресса в женской репродуктивной системе: обзор литературы. Пермский медицинский журнал, 4, 62–72. https://doi.org/10.17816/pmj40462-72. EDN: https://elibrary.ru/CUJHQS
2. Костюк, В. А., Потапович, А. И., & Ковалева, Ж. В. (1990). Простой и чувствительный метод определения активности супероксиддисмутазы, основанный на реакции окисления кверцитина. Вопросы медицинской химии, 36, 88–91. EDN: https://elibrary.ru/SCXIZD
3. Ланкин, В. З., & Гуревич, С. М. (1976). Ингибирование переокисления липидов и детоксикация липоперекисей защитными ферментативными системами (супероксиддисмутаза, глутатион-пероксидаза, глутатион-редуктаза) при экспериментальном злокачественном росте. Доклады Академии наук СССР, 226, 705–708.
4. Лебедева, Л. Ф. (2012). Физиологическая и ультразвуковая характеристика нормального эстрального цикла кобыл. Коневодство и конный спорт, 1, 16–18. EDN: https://elibrary.ru/OXNIUV
5. Ляхович, В. В., Вавилин, В. А., Зенков, Н. К., & Меньщикова, Е. Б. (2006). Активная защита при окислительном стрессе. Антиоксидант-респонсивный элемент. Биохимия, 71, 1183–1198. EDN: https://elibrary.ru/HVAEEX

6. Bradford, M. M. (1976). A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. Analytical Biochemistry, 72, 248–254.
7. Collins, A., Palmer, E., Bézard, J., Burke, J., Duchamp, G., & Buckley, T. (1997). A comparison of the biochemical composition of equine follicular fluid and serum at four different stages of the follicular cycle. Equine Veterinary Journal Supplement, 25, 12–16.
8. Ellman, G. L. (1959). Tissue sulfhydryl groups. Archives of Biochemistry and Biophysics, 82, 70–77.
9. Fu, X., Shi, L., Liu, P., Jiao, Y., Guo, S., Chen, Q., Zheng, Q., Chen, X., & Wang, Y. (2023). Expression and clinical significance of HIF-1α in follicular fluid and granulosa cells in infertile PCOS patients. Reproductive Sciences, 30, 2263–2274. https://doi.org/10.1007/s43032-022-01135-2. EDN: https://elibrary.ru/ELENTM
10. Galli, C., Duchi, R., Colleoni, S., Lagutina, I., & Lazzari, G. (2014). Ovum pick up, intracytoplasmic sperm injection and somatic cell nuclear transfer in cattle, buffalo and horses: from the research laboratory to clinical practice. Theriogenology, 81, 138–151.
11. Gloire, G., & Piette, J. (2009). Redox regulation of nuclear post-translational modifications during NF-kappaB activation. Antioxidants & Redox Signaling, 11, 2209–2222.
12. Gomard, T., Michaud, H. A., Tempé, D., Thiolon, K., & Pelegrin, M., Piechaczyk, M. (2010). An NF-kappaB-dependent role for JunB in the induction of proinflammatory cytokines in LPS-activated bone marrow-derived dendritic cells. PLOS ONE, 8, e9585.
13. Hajam, Y. A., Rani, R., Ganie, S. Y., Sheikh, T. A., Javaid, D., Qadri, S. S., Pramodh, S., Alsulimani, A., Alkhanani, M. F., Harakeh, S., Hussain, A., Haque, S., & Reshi, M. S. (2022). Oxidative stress in human pathology and aging: molecular mechanisms and perspectives. Cells, 11, 552. https://doi.org/10.3390/cells11030552. EDN: https://elibrary.ru/CJVEAV
14. Hinrichs, K. (2 prepared to be used in a sentence2018). Assisted reproductive techniques in mares. Reproduction in Domestic Animals, 53, 4–13.
15. Hyde, K. A., Aguiar, F. L. N., Alves, B. G., Alves, K. A., Gastal, G. D. A., Gastal, M. O., & Gastal, E. L. (2022). Preantral follicle population and distribution in the horse ovary. Reproduction and Fertility, 3, 90–102. https://doi.org/10.1530/raf-21-0100. EDN: https://elibrary.ru/XKLDII
16. Kang, K. A., & Hyun, J. W. (2017). Oxidative stress, Nrf2, and epigenetic modification contribute to anticancer drug resistance. Toxicological Research, 33, 1–5.

17. Luciano, A. M., Goudet, G., Perazzoli, F., Lahuec, C., & Gérard, N. (2006). Glutathione content and glutathione peroxidase expression in in vivo and in vitro matured equine oocytes. Molecular Reproduction and Development, 73, 658–666.
18. Mihara, M., Uchiyama, M., & Fukazawa, K. (1980). Thiobarbituric acid value on fresh homogenate of rat as a parameter of lipid peroxidation in aging, CCL intoxication and vitamin E deficiency. Biochemical Medicine, 23, 302–311.
19. Mohammed, A. A., Al-Suwaiegh, S., & Al-Shaheen, T. (2019). Effects of follicular fluid components on oocyte maturation and embryo development in vivo and in vitro. Advances in Animal and Veterinary Sciences, 7, 346–355.
20. Murakami, K., Kotani, Y., Nakai, H., & Matsumura, N. (2020). Endometriosis associated ovarian cancer: the origin and targeted therapy. Cancers (Basel), 12(6), 1676.
21. Park, J. Y., Chung, T. W., Jeong, Y. J., Kwak, C. H., Ha, S. H., Kwon, K. M., Abekura, F., Cho, S. H., Lee, Y. C., Ha, K. T., Magae, J., Chang, Y. C., & Kim, C. H. (2017). Ascofuranone inhibits lipopolysaccharide-induced inflammatory response via NF-kappaB and AP-1, p-ERK, TNF-α, IL-6 and IL-1β in RAW 264.7 macrophages. PLOS ONE, 12, e0171322.
22. Semenza, G. L. (2009). Regulation of oxygen homeostasis by hypoxia-inducible factor 1. Physiology (Bethesda), 24, 97–106. https://doi.org/10.1152/physiol.00045.2008. EDN: https://elibrary.ru/TBLBWG
23. Tang, Z., Xu, R., Zhang, Z., Shi, C., Zhang, Y., Yang, H., Lin, Q., Liu, Y., Lin, F., Geng, B., & Wang, Z. (2021). HIF-1α protects granulosa cells from hypoxia-induced apoptosis during follicular development by inducing autophagy. Frontiers in Cell and Developmental Biology, 9, 1–12. https://doi.org/10.3389/fcell.2021.631016. EDN: https://elibrary.ru/QXOZWG
24. Tatemoto, H., Muto, N., Sunagawa, I., Shinjo, A., & Nakada, T. (2004). Protection of porcine oocytes against cell damage caused by oxidative stress during in vitro maturation: role of superoxide dismutase activity in porcine follicular fluid. Biology of Reproduction, 71, 1150–1157.
25. Tucker, K. E., Cleaver, B. D., & Sharp, D. C. (1993). Does resumption of follicular estradiol synthesis during vernal transition in mares involve a shift in steroidogenic pathways? Journal of Biological Reproduction, 1, 519.
26. Watson, E. D., Thomassen, R., Steele, M., Heald, M., Leask, R., Groome, N. P., & Riley, S. C. (2002). Concentrations of inhibin, progesterone and oestradiol in fluid from dominant and subordinate follicles from mares during spring transition and the breeding season. Journal of Animal Reproduction Science, 74, 55–67.

27. Weber, D., Davies, M. J., & Grune, T. (2015). Determination of protein carbonyls in plasma, cell extracts, tissue homogenates, isolated proteins: focus on sample preparation and derivatization conditions. Redox Biology, 5, 367–380. https://doi.org/10.1016/j.redox.2015.06.005. EDN: https://elibrary.ru/UOUOQP

References

1. Berezina, D. A., Kudryavtseva, E. V., & Gavrilov, I. V. (2023). The role of oxidative stress in the female reproductive system: a literature review. Perm Medical Journal, 4, 62–72. https://doi.org/10.17816/pmj40462-72. EDN: https://elibrary.ru/CUJHQS
2. Kostyuk, V. A., Potapovich, A. I., & Kovaleva, Zh. V. (1990). A simple and sensitive method for determining superoxide dismutase activity based on the oxidation reaction of quercetin. Questions of Medical Chemistry, 36, 88–91. EDN: https://elibrary.ru/SCXIZD
3. Lankin, V. Z., & Gurevich, S. M. (1976). Inhibition of lipid peroxidation and detoxification of lipid peroxides by protective enzymatic systems (superoxide dismutase, glutathione peroxidase, glutathione reductase) in experimental malignant growth. Reports of the Academy of Sciences of the USSR, 226, 705–708.
4. Lebedeva, L. F. (2012). Physiological and ultrasound characteristics of the normal estrous cycle in mares. Horse Breeding and Equestrian Sports, 1, 16–18. EDN: https://elibrary.ru/OXNIUV
5. Lyakhovich, V. V., Vavilin, V. A., Zenkov, N. K., & Menshchikova, E. B. (2006). Active defense under oxidative stress. Antioxidant response element. Biochemistry, 71, 1183–1198. EDN: https://elibrary.ru/HVAEEX
6. Bradford, M. M. (1976). A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. Analytical Biochemistry, 72, 248–254.
7. Collins, A., Palmer, E., Bézard, J., Burke, J., Duchamp, G., & Buckley, T. (1997). A comparison of the biochemical composition of equine follicular fluid and serum at four different stages of the follicular cycle. Equine Veterinary Journal Supplement, 25, 12–16.
8. Ellman, G. L. (1959). Tissue sulfhydryl groups. Archives of Biochemistry and Biophysics, 82, 70–77.
9. Fu, X., Shi, L., Liu, P., Jiao, Y., Guo, S., Chen, Q., Zheng, Q., Chen, X., & Wang, Y. (2023). Expression and clinical significance of HIF-1α in follicular fluid and granulosa cells in infertile PCOS patients. Reproductive Sciences, 30, 2263–2274. https://doi.org/10.1007/s43032-022-01135-2. EDN: https://elibrary.ru/ELENTM

10. Galli, C., Duchi, R., Colleoni, S., Lagutina, I., & Lazzari, G. (2014). Ovum pick up, intracytoplasmic sperm injection and somatic cell nuclear transfer in cattle, buffalo and horses: from the research laboratory to clinical practice. Theriogenology, 81, 138–151.
11. Gloire, G., & Piette, J. (2009). Redox regulation of nuclear post-translational modifications during NF-kappaB activation. Antioxidants & Redox Signaling, 11, 2209–2222.
12. Gomard, T., Michaud, H. A., Tempé, D., Thiolon, K., & Pelegrin, M., Piechaczyk, M. (2010). An NF-kappaB-dependent role for JunB in the induction of proinflammatory cytokines in LPS-activated bone marrow-derived dendritic cells. PLOS ONE, 8, e9585.
13. Hajam, Y. A., Rani, R., Ganie, S. Y., Sheikh, T. A., Javaid, D., Qadri, S. S., Pramodh, S., Alsulimani, A., Alkhanani, M. F., Harakeh, S., Hussain, A., Haque, S., & Reshi, M. S. (2022). Oxidative stress in human pathology and aging: molecular mechanisms and perspectives. Cells, 11, 552. https://doi.org/10.3390/cells11030552. EDN: https://elibrary.ru/CJVEAV
14. Hinrichs, K. (2 prepared to be used in a sentence2018). Assisted reproductive techniques in mares. Reproduction in Domestic Animals, 53, 4–13.
15. Hyde, K. A., Aguiar, F. L. N., Alves, B. G., Alves, K. A., Gastal, G. D. A., Gastal, M. O., & Gastal, E. L. (2022). Preantral follicle population and distribution in the horse ovary. Reproduction and Fertility, 3, 90–102. https://doi.org/10.1530/raf-21-0100. EDN: https://elibrary.ru/XKLDII
16. Kang, K. A., & Hyun, J. W. (2017). Oxidative stress, Nrf2, and epigenetic modification contribute to anticancer drug resistance. Toxicological Research, 33, 1–5.
17. Luciano, A. M., Goudet, G., Perazzoli, F., Lahuec, C., & Gérard, N. (2006). Glutathione content and glutathione peroxidase expression in in vivo and in vitro matured equine oocytes. Molecular Reproduction and Development, 73, 658–666.
18. Mihara, M., Uchiyama, M., & Fukazawa, K. (1980). Thiobarbituric acid value on fresh homogenate of rat as a parameter of lipid peroxidation in aging, CCL intoxication and vitamin E deficiency. Biochemical Medicine, 23, 302–311.
19. Mohammed, A. A., Al-Suwaiegh, S., & Al-Shaheen, T. (2019). Effects of follicular fluid components on oocyte maturation and embryo development in vivo and in vitro. Advances in Animal and Veterinary Sciences, 7, 346–355.
20. Murakami, K., Kotani, Y., Nakai, H., & Matsumura, N. (2020). Endometriosis associated ovarian cancer: the origin and targeted therapy. Cancers (Basel), 12(6), 1676.

21. Park, J. Y., Chung, T. W., Jeong, Y. J., Kwak, C. H., Ha, S. H., Kwon, K. M., Abekura, F., Cho, S. H., Lee, Y. C., Ha, K. T., Magae, J., Chang, Y. C., & Kim, C. H. (2017). Ascofuranone inhibits lipopolysaccharide-induced inflammatory response via NF-kappaB and AP-1, p-ERK, TNF-α, IL-6 and IL-1β in RAW 264.7 macrophages. PLOS ONE, 12, e0171322.
22. Semenza, G. L. (2009). Regulation of oxygen homeostasis by hypoxia-inducible factor 1. Physiology (Bethesda), 24, 97–106. https://doi.org/10.1152/physiol.00045.2008. EDN: https://elibrary.ru/TBLBWG
23. Tang, Z., Xu, R., Zhang, Z., Shi, C., Zhang, Y., Yang, H., Lin, Q., Liu, Y., Lin, F., Geng, B., & Wang, Z. (2021). HIF-1α protects granulosa cells from hypoxia-induced apoptosis during follicular development by inducing autophagy. Frontiers in Cell and Developmental Biology, 9, 1–12. https://doi.org/10.3389/fcell.2021.631016. EDN: https://elibrary.ru/QXOZWG
24. Tatemoto, H., Muto, N., Sunagawa, I., Shinjo, A., & Nakada, T. (2004). Protection of porcine oocytes against cell damage caused by oxidative stress during in vitro maturation: role of superoxide dismutase activity in porcine follicular fluid. Biology of Reproduction, 71, 1150–1157.
25. Tucker, K. E., Cleaver, B. D., & Sharp, D. C. (1993). Does resumption of follicular estradiol synthesis during vernal transition in mares involve a shift in steroidogenic pathways? Journal of Biological Reproduction, 1, 519.
26. Watson, E. D., Thomassen, R., Steele, M., Heald, M., Leask, R., Groome, N. P., & Riley, S. C. (2002). Concentrations of inhibin, progesterone and oestradiol in fluid from dominant and subordinate follicles from mares during spring transition and the breeding season. Journal of Animal Reproduction Science, 74, 55–67.
27. Weber, D., Davies, M. J., & Grune, T. (2015). Determination of protein carbonyls in plasma, cell extracts, tissue homogenates, isolated proteins: focus on sample preparation and derivatization conditions. Redox Biology, 5, 367–380. https://doi.org/10.1016/j.redox.2015.06.005. EDN: https://elibrary.ru/UOUOQP

ВКЛАД АВТОРОВ

Калашников В.В.: разработка концепции научной работы, написание статьи.
Лебедева Л.Ф.: сбор материала, гинекологический осмотр животных, написание статьи.
Солодова Е.В.: сбор материала, гинекологический осмотр животных, проведение УЗИ-исследования.
Баковецкая О.В.: сбор и анализ данных, проведение литературного обзора.
Терехина А.А.: проведение биохимической пробоподготовки, анализ данных.

Абаленихина Ю.В.: проведение биохимических исследований, анализ данных, оформление статьи.

Щулькин А.В.: проведение вестерн-блот анализа, статистическая обработка полученных результатов, написание статьи.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Valery V. Kalashnikov: development of the concept of scientific work, writing an article.

Lyudmila F. Lebedeva: collecting material, gynecological examination of animals, writing an article.

Elena V. Solodova: collection of material, gynecological examination of animals, ultrasound examination. Bakovetskaya O.V.: data collection and analysis, conducting a literary review.

Anna A. Terekhina: conducting biochemical sample preparation, data analysis.

Yulia V. Abalenikhina: conducting biochemical research, data analysis, article design.

Alexey V. Shchulkin: conducting Western blot analysis, statistical processing of the results obtained, writing an article.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Калашников Валерий Васильевич, академик РАН, д-р с.-х. наук, профессор
ФГБНУ «ВНИИ коневодства им. академика В.В. Калашникова»
ул. Ученых, 500, п. Дивово, Глебковское С.П., Рязанская область, 391105, Российская Федерация
Vniik08@mail.ru

Лебедева Людмила Федоровна, д-р с.-х. наук, доцент, зав. лабораторией физиологии
ФГБНУ «ВНИИ коневодства им. академика В.В. Калашникова»
ул. Ученых, 500, п. Дивово, Глебковское С.П., Рязанская область, 391105, Российская Федерация
Lebedeva-L18@yandex.ru

Баковецкая Ольга Викторовна, д-р биол. наук, профессор, зав. кафедрой биологии
ФГБОУ ВО РязГМУ Минздрава России
ул. Высоковольтная, 9, г. Рязань, 390026, Российская Федерация
bakov.olga@mail.ru

Терехина Анна Александровна, канд. биол. наук, доцент кафедры биологии
ФГБОУ ВО РязГМУ Минздрава России
ул. Высоковольтная, 9, г. Рязань, 390026, Российская Федерация
terexina.ania1986@yandex.ru

Солодова Елена Владимировна, канд. биол. наук, старший научный сотрудник
ФГБНУ «ВНИИ коневодства им. академика В.В. Калашникова»
ул. Ученых, 500, п. Дивово, Глебковское С.П., Рязанская область, 391105, Российская Федерация
l.solodowa2012@yandex.ru

Абаленихина Юлия Владимировна, д-р мед. наук, доцент, профессор кафедры биологической химии, ведущий научный сотрудник
ФГБОУ ВО РязГМУ Минздрава России
ул. Высоковольтная, 9, г. Рязань, 390026, Российская Федерация
abalenihina88@mail.ru

Щулькин Алексей Владимирович, д-р мед. наук, доцент, профессор кафедры фармакологии, ведущий научный сотрудник
ФГБОУ ВО РязГМУ Минздрава России
ул. Высоковольтная, 9, г. Рязань, 390026, Российская Федерация
alekseyshulkin@rambler.ru

DATA ABOUT THE AUTHORS

Valery V. Kalashnikov, Academician of the Russian Academy of Sciences, MD (Agricultural Sciences), Professor
All-Russian Research Institute of Horse Breeding
Divovo village, Rybnovsky district, Ryazan region, 391105, Russian Federation
Vniik08@mail.ru
SPIN-code: 2240-0492
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9845-1691

Lyudmila F. Lebedeva, MD (Agricultural Sciences), Associate Professor, Head of the Physiology Laboratory
All-Russian Research Institute of Horse Breeding

Divovo village, Rybnovsky district, Ryazan region, 391105, Russian Federation
Lebedeva-L18@yandex.ru
SPIN-code: 6183-5929
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6960-5233

Olga V. Bakovetskaya, MD (Biol. Sciences), Professor, Head of the Department of Biology
Ryazan State Medical University
9, Vysokovoltnaya Str., Ryazan, 390026, Russian Federation
bakov.olga@mail.ru
SPIN-code: 1780-5469
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8102-4463

Anna A. Terekhina, Ph.D. in Biology, Associate Professor, Department of Biology
Ryazan State Medical University
9, Vysokovoltnaya Str., Ryazan, 390026, Russian Federation
terexina.ania1986@yandex.ru
SPIN-code: 5234-8631
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4824-5918

Elena V. Solodova, Ph.D. in Biology, Senior Researcher
All-Russian Research Institute of Horse Breeding
Divovo village, Rybnovsky district, Ryazan region, 391105, Russian Federation
l.solodowa2012@yandex.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3495-3478

Yulia V. Abalenikhina, MD, PhD, Associate Professor, Professor in the Department of Biological Chemistry, Leading Researcher
Ryazan State Medical University
9, Vysokovoltnaya Str., Ryazan, 390026, Russian Federation
abalenihina88@mail.ru
SPIN-code: 4496-9027
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0427-0967

Aleksey V. Shchulkin, MD, PhD, Associate Professor, Professor in the Department of Pharmacology, Leading Researcher

Ryazan State Medical University
9, Vysokovoltnaya Str., Ryazan, 390026, Russian Federation
alekseyshulkin@rambler.ru
SPIN-code: 2754-1702
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1688-0017

Поступила 13.11.2024
После рецензирования 20.12.2024
Принята 10.01.2025

Received 13.11.2024
Revised 20.12.2024
Accepted 10.01.2025

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-4-1489 **EDN: LEOJRO**
УДК 615.9:619.61

CC BY NC ND

Научная статья

НОВЫЕ ТРЕХКОМПОНЕНТНЫЕ СУПРАМОЛЕКУЛЯРНЫЕ ФОРМЫ ФЕНБЕНДАЗОЛА: ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРАВНИТЕЛЬНОЙ ОСТРОЙ ТОКСИЧНОСТИ НА БЕЛЫХ МЫШАХ

О.В. Дёмкина, С.С. Халиков, М.С. Халиков, М.М. Ильин, С.В. Карамушкина

Аннотация

Обоснование. Разработка новых форм антигельминтных препаратов, таких как супрамолекулярные комплексы фенбендазола, является актуальной задачей в условиях роста резистентности паразитов к традиционным препаратам. Усовершенствование растворимости и биодоступности фенбендазола возможно с использованием технологии механохимической модификации субстанции полимерными веществами.

Цель – синтезировать и провести сравнительную оценку острой токсичности новых супрамолекулярных форм фенбендазола в эксперименте на белых мышах.

Материалы и методы. Механохимической модификацией субстанции фенбендазола (ФБЗ) с помощью полимерных веществ ПВП, арабиногалактана (АГ), экстракта солодки (ЭС) получены твердые дисперсии, которые обладают повышенной растворимостью. Исследование острой токсичности супрамолекулярных комплексов ФБЗ:ПВП:ЭС (10:45:45) и ФБЗ:ПВП:АГ (10:45:45) проводилось на белых мышах. Методами пробит-анализа определялись показатели $ЛД_{50}$. Для оценки токсичности использовались клинические наблюдения и патологоанатомическое вскрытие. Статистическая обработка данных проводилась с использованием AtteStat.

Результаты. Механохимической обработкой субстанции фенбендазола в присутствии полимерных веществ получены новые супрамолекулярные формы, которые обладают большей острой токсичностью по сравнению с чистым фенбендазолом. $ЛД_{50}$ для ФБЗ:ПВП:ЭС составила 43729,97 мг/кг, для ФБЗ:ПВП:АГ — 49997,07 мг/кг. Комплекс ФБЗ:ПВП:ЭС характеризуется более выра-

женными дозозависимыми эффектами, включая потерю аппетита, массу тела и неврологические симптомы, чем ФБЗ:ПВП:АГ. Максимальная летальность зафиксирована в группе, получавшей ФБЗ:ПВП:ЭС в дозе 20000 мг/кг (50%).

Заключение. Полученные данные свидетельствуют о перспективности использования супрамолекулярных форм фенбендазола для повышения антигельминтной эффективности. Однако повышенная токсичность требует дальнейшего изучения безопасности и оптимизации дозировок.

Ключевые слова: фенбендазол; полимерные вещества; механохимия; твердые дисперсии; острая токсичность; супрамолекулярные комплексы; антигельминтная активность

Для цитирования. Дёмкина, О. В., Халиков, С. С., Халиков, М. С., Ильин, М. М., & Карамушкина, С. В. (2025). Новые трехкомпонентные супрамолекулярные формы фенбендазола: определение сравнительной острой токсичности на белых мышах. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(4), 182-205. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-4-1489

Original article

NEW THREE-COMPONENT SUPRAMOLECULAR FORMS OF FENBENDAZOLE: DETERMINATION OF COMPARATIVE ACUTE TOXICITY IN WHITE MICE

O.V. Demkina, S.S. Khalikov, M.S. Khalikov, M.M. Ilyin, S.V. Karamushkina

Abstract

Background. The development of new forms of anthelminthic drugs, such as supramolecular complexes of fenbendazole, is a topical task in the conditions of increasing parasite resistance to traditional drugs. Improvement of the solubility and bioavailability of fenbendazole is possible by mechanochemical modification of the substance with polymeric substances.

Purpose. Synthesis and comparative evaluation of acute toxicity of new supramolecular forms of fenbendazole in an experiment on white mice.

Materials and methods. The technology of mechanochemical modification of fenbendazole substance (FBZ) with the help of polymeric substances - PVP, arabinoga-lactan (AG), liquorice extract (LE) - produced solid dispersions with increased solubility. The acute toxicity of the supramolecular complexes FBZ:PVP:LE (10:45:45) and FBZ:PVP:AG (10:45:45) was studied in white mice. LD_{50} val-

ues were determined using probit analysis methods. Clinical observations and necropsy were used to assess toxicity. Statistical processing of the data was performed using AtteStat.

Results. New supramolecular forms with higher acute toxicity than pure fenbendazole were obtained by mechanochemical processing of fenbendazole in the presence of polymeric substances. The LD_{50} for FBZ:PVP: LE was 43729.97 mg/kg and for FBZ:PVP:AG - 49997.07 mg/kg. The FBZ:PVP: LE complex was characterised by more pronounced dose-dependent effects, including loss of appetite, body weight and neurological symptoms compared to FBZ:PVP:AG. The highest mortality was observed in the group receiving FBZ:PVP: LE at a dose of 20000 mg/kg (50%).

Conclusion. The obtained data indicate the promising use of supramolecular forms of fenbendazole to improve anthelminthic efficacy. However, increased toxicity requires further safety studies and dose optimization studies.

Keywords: fenbendazole; polymeric substances; mechanochemistry; solid dispersions; acute toxicity; supramolecular complexes; anthelmintic activity

For citation. Demkina, O. V., Khalikov, S. S., Khalikov, M. S., Ilyin, M. M., & Karamushkina, S. V. (2025). New three-component supramolecular forms of fenbendazole: determination of comparative acute toxicity in white mice. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(4), 182-205. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-4-1489

Введение

Антигельминтики из класса бензимидазолов наиболее широко используются в ветеринарной практике. Препараты применяются как в базовой форме, так и в составе комплексных препаратов для лечения гельминтозов большинства сельскохозяйственных и мелких домашних животных. Но в связи с активным и продолжительным использованием во всем мире отмечаются признаки развития устойчивости гельминтов к препаратам этого класса [14]. Одним из способов достижения необходимой эффективности терапии является увеличение дозы препаратов и кратности введения, что еще больше усугубляет проблему резистентности [20].

Фенбендазол (ФБЗ) обладает широким спектром нематодоцидного и цестодоцидного действия, активен в отношении взрослых форм, личинок и яиц нематод ЖКТ и легких, а также цестод, паразитирующих у животных [21]. В связи с вышеизложенным, известно множество препаратов на основе ФБЗ, которые рекомендованы для применения в ветеринарной и гуманной медицине. Его действие основано на ингибировании полимеризации тубулина в микротрубочки, что приводит к нарушению цитоскелета

гельминтов. Однако низкая растворимость фенбендазола в воде и ограниченная биодоступность усложняют его эффективное применение [1]. Одним из направлений повышения эффективности бензимидазолов является разработка новых лекарственных форм без изменения химической структуры базового вещества с повышенной растворимостью и доступностью [22]. К альтернативным методам относится технология механохимической модификации лекарственных субстанций с помощью полимерных веществ [17]. Создание супрамолекулярных комплексов фенбендазола с различными наноструктурными носителями позволяет повысить растворимость и биодоступность фенбендазола [3]. Композиции с системами адресной доставки на основе полисахаридов, динатриевой соли глицирризиновой кислоты [5], наночастиц кремния [15], валеролактама [19] обладают высокой водорастворимостью и биодоступностью для тканей и клеток организма [2]. Это свойство комплексов даёт возможность снизить терапевтические дозы и сократить курс лечения [4].

Вещества, входящие в состав супрамолекулярных комплексов, обладают рядом химических и биологических особенностей. Поливинилпирролидон стабилизирует активные компоненты через водородные связи и гидрофобные взаимодействия. Экстракт солодки, содержащий глицирризиновую кислоту, обладает мембраностабилизирующими и противовоспалительными свойствами [18]. Арабиногалактан, как природный полисахарид, повышает биологическую доступность, снижает побочные эффекты и токсичность, является иммуномодулятором и обладает гастропротекторной активностью [10]. В синергии эти компоненты защищают фенбендазол от преждевременного разрушения, обеспечивают высокую растворимость в физиологических жидкостях и устойчивость к действию ферментов желудочно-кишечного тракта, что снижает потерю активного вещества [7].

Однако улучшение фармакокинетики сопровождается риском повышения токсичности из-за увеличенной системной экспозиции препарата. Исследования на лабораторных животных показали, что супрамолекулярные комплексы фенбендазола характеризуются более высокой токсичностью, чем базовое вещество. Токсичность дозы зависима и варьируется в зависимости от состава комплекса [6].

Для проведения исследований токсичности новых супрамолекулярных форм ФБЗ были получены его твердые дисперсии (ТД) методом механохимической модификации ФБЗ с помощью комбинации полимеров из поливинилпирролидона (ПВП), экстракта солодки (ЭС) и арабиногалакта-

на (АГ). Изучение острой пероральной токсичности экспериментальных ТД составов ФБЗ:ПВП:ЭС (10:45:45) и ФБЗ:ПВП:АГ (10:45:45) ранее не проводилось.

Цель исследования – синтез и сравнительная оценка острой токсичности супрамолекулярных комплексов ФБЗ с различными полимерными носителями в эксперименте на белых мышах. Исследование позволит выявить дозозависимость токсических проявлений, летальность, безопасные дозы и определить перспективы использования комплексов в ветеринарной практике.

Материалы и методы исследования

Объекты исследований. Объектами исследования были выбраны субстанция фенбендазола и следующие полимерные вещества:

- фенбендазол (ФБЗ) – 5-(фенилтио)-2-бензимидазолкарбамат, производства Changzhou Yabang Pharmaceuticals Co. Ltd (КНР);
- поливинилпирролидон – 1-этенилпирролидин-2-он (ПВП) марки К-15 компании Boai NKY Pharmaceuticals Ltd. (КНР);
- полисахарид арабиногалактан (АГ) – марка «Левитол-арабиногалактан», ТУ 9325-008-70692152-08 компании АО «Аметис» (Россия);
- экстракт солодки (ЭС) – декларация соответствия TCN RU Д–RU.AF96.B.00958 производства ООО «Вистера» (Россия).

Твердые дисперсии (ТД) фенбендазола получали путем механообработки исходных компонентов, взятых в соответствующих весовых количествах, на валковой шаровой мельнице LE-101 с регулируемой энергонапряженностью [16]. Изменение растворимости полученных ТД фиксировали методом ВЭЖХ, суть которого заключается в определении содержания субстанции ФБЗ в аликвоте воды после 3-х часового растворения навески твердой дисперсии (около 500 мг) в 10 мл дистиллированной воды при перемешивания на магнитной мешалке Heidolph MR 3001 K (Германия). За критерий отбора композиций на испытания антигельминтной активности выбирали величину увеличения растворимости субстанции.

Эксперимент по оценке острой токсичности пероральных супрамолекулярных комплексов (СМК) проводили с участием белых мышей на базе вивария Дальневосточного государственного аграрного университета. Условия содержания и кормления осуществлялись согласно Руководству по содержанию и уходу за лабораторными животными [11]. При проведении исследований на животных учитывали этические аспекты согласно Европейской Конвекцией по защите позвоночных животных, используемых для экспериментальных или иных научных целей [8, 9].

Оценивали токсичные свойства двух трехкомпонентных супрамолекулярных комплексов фенбендазола составов ФБЗ:ПВП:ЭС (10:45:45) и ФБЗ:ПВП:АГ (10:45:45) с 10% содержания ФБЗ. В качестве положительного контрольного препарата выступал базовый 97% фенбендазол. Группа отрицательного контроля никаких препаратов не получала.

Дозы для тестирования были выбраны 5000, 10000, 15000 и 20000 мг/кг по комплексу или 500, 1000, 1500, 2000 мг/кг по активному веществу фенбендазола. Диапазон доз был выбран согласно руководству по доклиническому изучению новых фармакологических веществ [13]. Так же учитывались результаты других экспериментов по изучению острой токсичности супрамолекулярных комплексов фенбендазола [6]. Расчет дозировки препаратов производился исходя из среднего живого веса 20 г, так как разброс массы животных составлял не более 10%. Введение препаратов осуществлялось однократно внутрижелудочно с помощью атравматичного зонда. Из исследуемых препаратов готовилась суспензия с физиологическим раствором. Доза суспензии на одну мышь рассчитана в объеме 0,5 мл исходя из рекомендаций [12].

Дизайн эксперимента. Для проведения эксперимента были отобраны 130 белых мышей возрастом 4-5 недель, обоего пола, массой 19-21 г, которые затем были распределены на 13 групп по 10 голов. Экспериментальные и контрольные группы формировались методом стратифицированной рандомизации. Критерием выступала живая масса. Всех мышей взвесили и отобрали поровну самцов и самок с массой 19-21 г и разделили на страты: самцы и самки. Затем случайным образом распределили животных на 13 групп (n=10), состоящих из самцов и самок поровну. В итоге были сформированы два экспериментальных кластера (ФБЗ:ПВП:ЭС и ФБЗ:ПВП:АГ), один кластер положительного контроля (ФБЗ). В каждом кластере сформировали по четыре группы в зависимости от дозы фенбендазола по ДВ: 500, 1000, 1500, 2000 мг/кг. Дополнительно к раздельному содержанию и маркировке клеток, каждая мышь была пронумерована маркером на внутренней стороне уха. Группа отрицательного контроля состояла из 10 мышей (рис. 1).

Введение препаратов производилось в утренние часы после 12-часовой голодной диеты для максимального опорожнения желудка. Ввиду невозможности введения порошкообразной формы комплексов, они были суспендированы. Для приготовления суспензии для каждой группы испытуемых мышей отвешивали необходимую дозу препарата на аналитических весах. К навеске постепенно добавляли физиологический раствор и,

при постоянном помешивании, доводили объем суспензии до 5 мл. Далее приготовленную суспензию незамедлительно вводили с помощью зонда в желудок мышей. Мышь удерживали рукой, фиксируя голову и шею. Зонд через ротовую полость осторожно продвигали по пищеводу в желудок. Глубину введения контролировали расстоянием от носа до конца грудной клетки. После успешного введения на конец зонда прикрепляли шприц и медленно вводили рассчитанный объем препарата. После извлечения зонда проверяли общее состояние мышей для исключения признаков травмы или регургитации.

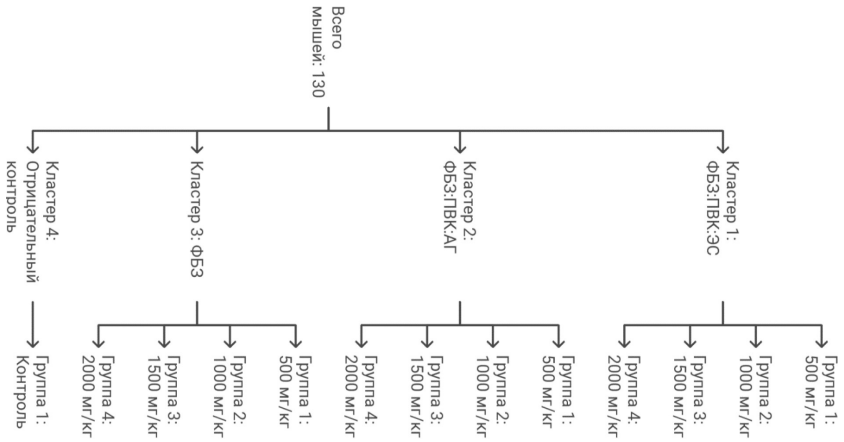


Рис. 1. Схема распределения животных по экспериментальным группам

В течении 14 дней после введения препаратов за животными велось наблюдение. Все параметры заносились в протокол наблюдения. Данные фиксировались в бумажной форме, затем переносились в таблицы Excel для упрощения дальнейшей обработки. Протокол наблюдений состоял из разделов идентификационной информации (кластер, группа, дата), общих параметров (пол, масса тела), клинических наблюдений (поведение, дыхание, состояние кожи, состояние слизистых оболочек, пищевое поведение, неврологические симптомы, смертность).

При гибели животного проводилось его патологоанатомическое вскрытие для оценки повреждений внутренних органов. Исследовалось наличие или отсутствие гиперемии стенок желудка и кишечника, несвернувшейся крови в предсердиях, кровоизлияний на поверхности печени и почек и других изменений внутренних органов.

При оценке дозозависимых эффектов пероральной токсичности корреляционную связь устанавливали с помощью критерия Пирсона. Статистически значимым различием считали значение p-value < 0,05. Расчет ЛД50 проводился по методу пробит-анализа по Литчфилду и Уилкоксону [23]. Статистические расчеты проводили в программе AtteStat.

Результаты

Данные увеличения растворимости фенбендазола (см. таблицу 1) в его экспериментальных ТД с полимерными веществами предполагали существенные изменения в биологических свойствах этих ТД, которые в воде образовывали стабильные суспензии.

Таблица 1.

Растворимость фенбендазола в экспериментальных образцах

№	Наименование образца, состав и условия получения	Растворимость	
		абсолютная, мг/л	увеличение
1	ФБЗ - исходная субстанция	0,10	-
2	ТД состава ФБЗ:ПВП:АГ = 10:45:45, после 2 ч м/о*	0,60	6,0
3	ТД состава ФБЗ:ПВП:ЭС = 10:45:45 после 1,5 ч м/о*	1,10	11,0

*-механохимическая обработка на мельнице LE-101

Перед приготовлением суспензии исследуемых препаратов были произведены необходимые расчеты, исходя их средней массы мыши 20 г. Необходимое количество препарата на группу животных взвешивалось на аналитических весах и затем готовилась суспензия требуемого объема (таблица 2).

Таблица 2.

Расчетные объемы исследуемых препаратов, мышь массой 20 г

Группа	Препарат, мг/кг	Фенбендазол по ДВ мг/кг	Общее количество препарата на группу, мг	Препарат, мг/гол	Фенбендазол по ДВ на мышь, мг	Общий объем суспензии на группу, мл	Объем суспензии на мышь, мл
Супрамолекулярные комплексы фенбендазола							
1	5000	500	1000	100	10	5	0,5
2	10000	1000	2000	200	20	5	0,5

3	15000	1500	3000	300	30	5	0,5
4	20000	2000	4000	400	40	5	0,5
Фенбендазол 97%							
1	10,31	500	103,1	100	10	5	0,5
2	20,62	1000	206,2	200	20	5	0,5
3	30,93	1500	309,3	300	30	5	0,5
4	41,24	2000	412,4	400	40	5	0,5

Отмечалась отличная смешиваемость супрамолекулярных комплексов с физиологическим раствором. Приготовленные суспензии для введения имели однородную, густую, мягкую консистенцию, без комочков и осадка. Суспензия, приготовленная и базового фенбендазола, визуально содержала взвесь нерастворенных крупинок. После внутрижелудочного введения необходимой дозы препаратов животные в экспериментальных группах и группе положительного контроля сохранили активность и подвижность, признаков травмирования и регургитации не наблюдалось.

После введения исследуемого комплекса мышам экспериментальных групп в течение дня проводились наблюдения каждые два часа. Каких-либо изменений в поведении животных в первые 12 часов наблюдений зафиксировано не было. В дальнейшем характерные признаки острой пероральной токсичности фиксировались только в двух группах: получивших дозу комплексов 15000 мг/кг и 20000 мг/кг.

Тестирование комплекса ФБЗ:ПВП:ЭС. На вторые сутки у большинства животных начали фиксировать снижение или отсутствие аппетита, угнетение, тремор. При ежедневном контрольном взвешивании животные, имеющие признаки острой пероральной токсичности, теряли в весе от 1 до 3 г. Летальные исходы были зафиксированы в группе, получившей СМК в дозе 20000 мг/кг (таблица 3).

Таблица 3.

Частота клинических проявлений острой пероральной токсичности комплекса *ФБЗ:ПВП:ЭС 10%* при различных дозах (n=40)

Признак	Проявление	Доза препарата, мг\кг			
		5000	10000	15000	20000
Аппетит	снижен	0	1	1	2
	отсутствует	0	0	1	6
Масса тела	потеря <10%	0	0	2	3
	потеря >10%	0	0	0	7

Активность	возбуждение	0	0	1	0
	угнетение	0	0	0	4
	летаргия	0	0	0	4
Нервно-мышечная реакция	тремор	0	0	0	2
	судороги	0	0	0	3
Поведение	пугливость	0	0	0	1
	апатия	0	0	0	6
Падеж		0	0	0	5

К концу вторых суток пала одна мышь, затем погибли по одной мыши на 3, 5, 7 и 13 дни наблюдений. Перед гибелью животные были апатичны, не реагировали на внешние раздражители, наблюдались судороги и тремор. Потеря массы тела у павших животных колебалась от 2 до 4 г. Из пяти павших животных было три самца и две самки. Каждое павшее животное подвергалось патологоанатомическому вскрытию. При исследовании органов отмечены следующие изменения: сердце дряблое, в камерах содержится несвернувшаяся кровь; легкие отечны; почки и печень с мелкоточечными единичными кровоизлияниями на поверхности; желудок без содержимого, слизистая оболочка гиперемирована, серозная бледно-серого цвета; тонкий кишечник отечен, единичные кровоизлияния на слизистой оболочке; брыжеечные сосуды кровенаполнены; сальник и внутренний жир инфильтрирован сосудами. Мышь, павшая на 13 день, не имела патологических изменений внутренних органов.

Тестирование комплекса ФБЗ:ПВП:АГ. Проявление острой пероральной токсичности в группах стали отмечать в начале вторых суток после введения препарата. Некоторые животные, получившие дозу препарата 15000 мг/кг были угнетены, пугливы и неохотно поедали привычный корм. В группе мышей, получивших дозу комплекса 20000 мг/кг, признаки острой токсичности были выражены ярче. Угнетение и снижение аппетита наблюдали у большинства животных в группе. Эти признаки наблюдали в течение 3 суток после применения комплекса, затем животные либо восстанавливали физиологические функции, либо погибали. Средняя потеря живой массы у животных с изменениями в приеме корма составила 2±0,21 г. В группе, получившей СМК в дозе 20000мг/кг, зафиксировано четыре летальных исхода. Два животных (самцы) пало на вторые сутки, два (самец и самка) – на 7-е сутки после введения препарата (таблица 4).

Таблица 4.

Частота клинических проявлений острой пероральной токсичности комплекса *ФБЗ:ПВП:АГ 10%* при различных дозах (n=40)

Признак	Проявление	Доза препарата, мг\кг			
		5000	10000	15000	20000
Аппетит	снижен	0	0	2	3
	отсутствует	0	0	0	3
Масса тела	потеря <10%	0	0	1	5
	потеря >10%	0	0	0	4
Активность	возбуждение	0	1	0	0
	угнетение	0	0	1	5
	летаргия	0	0	0	1
Нервно-мышечная реакция	тремор	0	0	0	2
	судороги	0	0	0	0
Поведение	пугливость	0	0	1	0
	апатия	0	0	0	6
Падеж		0	0	0	4

При патологоанатомическом вскрытии у всех павших животных были обнаружены изменения в органах грудной и брюшной полости. Сердечные камеры наполнены несвернувшейся кровью, легкие отечны, слизистая оболочка желудка и тонкого отдела кишечника гиперемирована, с единичными точечными кровоизлияниями, сосуды брыжейки наполнены кровью, жировая ткань брюшной полости инфильтрирована кровеносными сосудами, на поверхности печени и почек единичные точечные кровоизлияния.

Положительный контроль. Во время наблюдений в группах положительного контроля падежа животных не регистрировали. На вторые и третьи сутки в группе отмечали некоторое уменьшение аппетита и снижение активности у трех мышей, получившей дозу препарата 41,24 мг/кг. На четвертые сутки и далее до конца эксперимента данные симптомы не регистрировались. Колебания в живой массе животных в группе не превышало 10%.

Отрицательный контроль. Все животные в данной группе на протяжении 14 дней наблюдения сохраняли подвижность, нормальный аппетит, не проявляли агрессии, падежа не регистрировали.

Дозозависимость токсичности. На графиках представлены данные, характеризующие дозозависимость токсичности супрамолекулярных ком-

плексов фенбендазола (ФБЗ:ПВП:ЭС и ФБЗ:ПВП:АГ) при введении различных доз препаратов.

Для комплекса ФБЗ:ПВП:ЭС наблюдается четкая зависимость между увеличением дозы и частотой проявления токсических эффектов. При дозе 15 г/кг начинают фиксироваться клинические проявления токсичности, включая снижение аппетита (10% животных), потерю массы тела (20% животных с потерей до 10%), а также первые признаки неврологических нарушений. На максимальной дозе 20 г/кг у большинства животных отмечены снижение или полное отсутствие аппетита, значительная потеря массы тела (до 10% и более), а также выраженные неврологические симптомы, такие как летаргия, тремор и судороги. Летальные исходы зафиксированы у 50% животных данной группы (рис. 2).

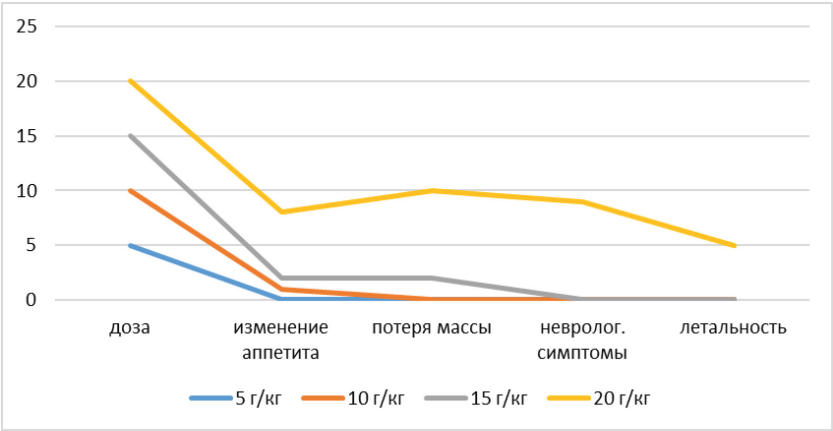


Рис. 2. Дозозависимость токсичности комплекса ФБЗ:ПВП:ЭС 10%

Для комплекса ФБЗ:ПВП:АГ токсические проявления также усиливаются с увеличением дозы, но отмечается менее выраженный характер эффектов по сравнению с ФБЗ:ПВП:ЭС. Клинические признаки токсичности начинают проявляться на дозе 15 г/кг, включая снижение аппетита и потерю массы тела у небольшого числа животных. На максимальной дозе 20 г/кг наблюдается увеличение частоты нарушений аппетита и массы тела, а также появление неврологических симптомов, таких как летаргия и тремор. Однако судороги в данной группе не зафиксированы. Летальные исходы отмечены у 40% животных, что ниже, чем у ФБЗ:ПВП:ЭС при аналогичной дозе (рис. 3).

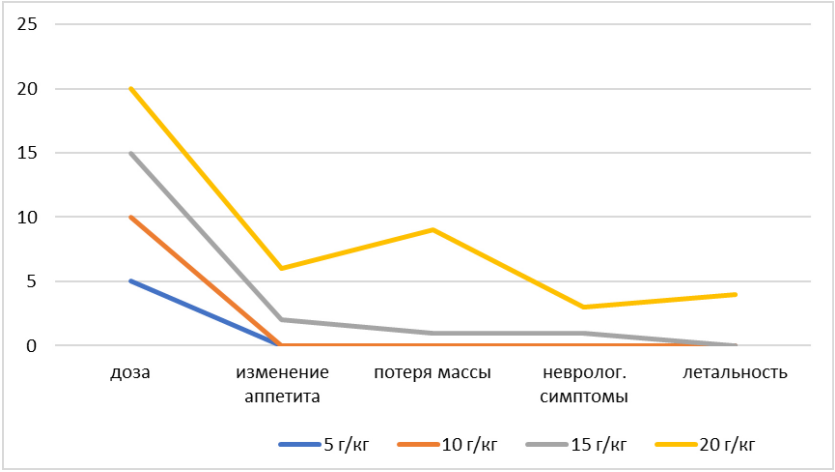


Рис. 3. Дозозависимость токсичности комплекса ФБЗ:ПВП:АГ 10%

Супрамолекулярные комплексы фенбендазола обладают большей токсичностью по сравнению с чистым фенбендазолом. Базовый фенбендазол в дозах до 40 мг/кг по ДВ не проявил токсических эффектов. У животных наблюдаются лишь незначительные изменения аппетита и массы тела, причем даже на высоких дозах неврологические симптомы отсутствовали, летальные случаи не зарегистрированы. Вероятно, это связано с его низкой растворимостью и ограниченным всасыванием в желудочно-кишечном тракте.

Для СМК (ФБЗ:ПВП:ЭС и ФБЗ:ПВП:АГ) характерны выраженные токсические проявления, включая снижение аппетита, значительную потерю массы тела и неврологические симптомы (летаргия, тремор, судороги). Эти эффекты становятся заметными на дозах ≥30 мг/кг по ДВ фенбендазола. Летальность ФБЗ:ПВП:ЭС достигает 50%, ФБЗ:ПВП:АГ – 40% при максимальной испытуемой дозе. СМК фенбендазола проявляют более высокую токсичность по сравнению с базовым веществом, что связано с улучшением растворимости и биодоступности действующего вещества.

Данные зависимостей признаков токсичности от введенной дозы препаратов обработаны статистически (таблица 5).

Все переменные демонстрируют положительные и сильные положительные связи с дозой препаратов. С увеличением дозы препаратов будут возрастать токсические эффекты. Но все полученные значения p-value

больше статистически значимых. Переменная «Снижение аппетита» в кластере ФБЗ:ПВП:АГ показывает наибольшую связь с дозой, с коэффициентом корреляции, близким к статистической значимости. Вероятно, с увеличением числа выборки и диапазона исследуемых доз корреляционные зависимости достигнут статистически значимых значений.

Таблица 5.

Корреляционная зависимость выраженности токсических проявлений от дозы СМК

СМК	Эффект	Коэффициент	Связь	Р-значение
ФБЗ:ПВП:ЭС	снижение аппетита	0,887	положительная	0,113
	потеря массы	0,868	сильная положительная	0,132
	изменение активности	0,836	сильная положительная	0,164
	нервно-мышечные явления	0,775	положительная	0,225
	летальность	0,775	положительная	0,226
ФБЗ:ПВП:АГ	снижение аппетита	0,913	сильная положительная	0,087
	потеря массы	0,829	сильная положительная	0,171
	изменение активности	0,836	сильная положительная	0,164
	нервно-мышечные явления	0,775	положительная	0,225
	летальность	0,774	положительная	0,2254

$ЛД_{50}$ супрамолекулярных комплексов. Установлена ЛД50 для супрамолекулярных комплексов методом пробит-анализа по Литчфилду и Уилкоксону. Расчетная доза $ЛД_{50}$ для комплекса ФБЗ:ПВП:ЭС составляет 43729,97 мг/кг, для комплекса ФБЗ:ПВП:АГ – 49997,07 мг/кг.

Обсуждение

Целью исследования была сравнительная оценка острой токсичности супрамолекулярных комплексов фенбендазола (ФБЗ:ПВП:ЭС и ФБЗ:ПВП:АГ) и чистого фенбендазола. Эксперимент проводился на белых мышах с анализом дозозависимости токсических эффектов, включая летальность, неврологические симптомы, потерю массы и изменение аппе-

тита. Получены результаты высокой биологической значимости. Данные подтверждают гипотезу о том, что супрамолекулярные формы фенбендазола обладают улучшенной растворимостью и биодоступностью, что может приводить к увеличению токсичности. Это подтверждается дозозависимыми эффектами и снижением аппетита, потерей массы тела и неврологическими симптомами у животных. Острая токсичность супрамолекулярных комплексов фенбендазола превышает токсичность чистого фенбендазола. Максимальная летальность наблюдается в кластере ФБЗ:ПВП:ЭС при дозе по комплексу 20000 мг/кг или 2000 мг/кг по ДВ (50%). Комплекс ФБЗ:ПВП:ЭС продемонстрировал более высокую токсичность по сравнению с ФБЗ:ПВП:АГ при всех исследованных дозах. Летальность в кластере ФБЗ:ПВП:АГ составила 40% при максимальной дозе. ЛД50 для обоих комплексов составила более 20000 мг/кг по препарату и более 2000 мг/кг по ДВ соответственно. Чистый фенбендазол в исследуемых дозах не вызывал летальных исходов, что подтверждает его низкую острую токсичность. Выявлена дозозависимая динамика токсических эффектов для супрамолекулярных комплексов, включая снижение аппетита, потерю массы и неврологические нарушения. Исследование имеет ряд ограничений. Минимальный объем выборки (n=10 на группу) снизил статистическую значимость анализа и требует осторожности при интерпретации результатов. Исследование ограничено оценкой острой токсичности. В перспективе дальнейших исследований необходимо увеличение объема выборки животных на каждую дозу испытуемого препарата для повышения достоверности статистических выводов, изучение хронической токсичности и кумулятивных эффектов супрамолекулярных комплексов фенбендазола. Результаты исследования подтверждают необходимость дальнейшего изучения безопасности супрамолекулярных комплексов фенбендазола для эффективного применения в условиях развивающейся резистентности гельминтов.

Заключение

Впервые получены твердые дисперсии фенбендазола следующих экспериментальных составов ФБЗ:ПВП:ЭС (10:45:45) и ФБЗ:ПВП:АГ (10:45:45), которые в воде образовывали супрамолекулярные комплексы с повышенной растворимостью. Установлено, что супрамолекулярные комплексы фенбендазола обладают большей острой токсичностью по сравнению с чистым фенбендазолом. Комплекс ФБЗ:ПВП:ЭС проявил более высокую токсичность по сравнению с ФБЗ:ПВП:АГ, включая большую ча-

стоту неврологических нарушений и летальность. Дозозависимые эффекты супрамолекулярных комплексов включали снижение аппетита, потерю массы тела и неврологические симптомы, которые наиболее выражены при дозах ≥1500 мг/кг по действующему веществу фенбендазола. $ЛД_{50}$ для ФБЗ:ПВП:ЭС составила 43729,97 мг/кг, для ФБЗ:ПВП:АГ – 49997,07 мг/кг. Полученные данные подтверждают перспективность супрамолекулярных форм фенбендазола для повышения эффективности антигельминтной терапии, но требуют дополнительных исследований для оценки безопасности и оптимизации дозировок.

Заключение комитета по этике. Исследование проведены в соответствии с требованиями Европейской конвенции о защите позвоночных животных, используемых для экспериментов или в научных целях (ETS No123, Страсбург, 1986).

Информация о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация о спонсорстве. Работа выполнена в рамках Государственного задания № 075-00277-24-00 при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Список литературы

1. Архипов, И. А. (2009). *Антигельминтики: фармакология и применение* (с. 47–55). Москва: РАСХН. ISBN: 978-5-85941-305-8. EDN: https://elibrary.ru/QLTSHX
2. Архипов, И. А., Варламова, А. И., Халиков, С. С., Садов, К. М., & Душкин, А. В. (2020). Влияние механохимической технологии на антигельминтную эффективность супрамолекулярных комплексов фенбендазола с экстрактом солодки. *Российский паразитологический журнал*, *14*(1), 70–74. https://doi.org/10.31016/1998-8435-2020-14-1-70-74. EDN: https://elibrary.ru/DKQINK
3. Варламова, А. И., Архипов, И. А., Халиков, С. С., & Садов, К. М. (2019). Эффективность фенбендазола на основе наноразмерной супрамолекулярной системы доставки с поливинилпирролидоном и диоктилсульфосукцинатом натрия при гельминтозах. *Российский паразитологический журнал*, *13*(1), 56–63. https://doi.org/10.31016/1998-8435-2019-13-1-56-63. EDN: https://elibrary.ru/IVVHJM
4. Варламова, А. И., Лимова, Ю. В., Садов, К. М., Садова, А. К., Белова, Е. Е., Радионов, А. В., Халиков, С. С., Чистяченко, Ю. С., Душкин, А. В., Ски-

ра, В. Н., & Архипов, И. А. (2016). Эффективность супрамолекулярного комплекса фенбендазола при нематодозах овец. *Российский паразитологический журнал*, (1), 76–81. https://doi.org/10.12737/18364. EDN: https://elibrary.ru/VQVDSP

5. Варламова, А. И., & Архипов, И. А. (2020). Биологическая активность фенбендазола на основе супрамолекулярной системы доставки с динатриевой солью глицирризиновой кислоты. *Сельскохозяйственная биология*, *55*(4), 830–842. https://doi.org/10.15389/agrobiology.2020.4.830rus. EDN: https://elibrary.ru/AICXPB
6. Варламова, А. И., & Архипов, И. А. (2020). Сравнительная острая токсичность супрамолекулярных комплексов фенбендазола с использованием разных полимеров для адресной доставки. *Российский паразитологический журнал*, *14*(2), 83–87. https://doi.org/10.31016/1998-8435-2020-14-2-83-87. EDN: https://elibrary.ru/CBLONP
7. Варламова, А. И., Мовсесян, С. О., Архипов, И. А., Халиков, С. С., Арисов, М. В., Кочетков, П. П., и др. (2020). Биологическая активность и особенности фармакокинетики фенбендазола на основе супрамолекулярной системы адресной доставки с экстрактом солодки и натрия диоктилсульфосукцинатом. *Известия Российской академии наук. Серия биологическая*, (6), 565–574. https://doi.org/10.31857/S0002332920060132. EDN: https://elibrary.ru/GBPKFA
8. Европейская конвенция о защите позвоночных животных, используемых для экспериментов или в иных научных целях (1986). Получено из: https://base.garant.ru/4090914/ (дата обращения: 01.09.2024).
9. Исакова, М. Н., Красноперов, А. С., Дроздова, Л. И., Шкуратова, И. А., & Хонина, Т. Г. (2023). Исследование хронической токсичности фармакологической композиции на основе бактериоцина-низина и глицеролатов кремния. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *15*(4), 112–135. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2023-15-4-112-135. EDN: https://elibrary.ru/SRZSNT
10. Медведева, Е. Н., Бабкин, В. А., & Остроухова, Л. А. (2003). Арабиногалактан лиственницы — свойства и перспективы использования (обзор). *Химия растительного сырья*, (1), 27–37. EDN: https://elibrary.ru/HYPXOB
11. ГОСТ 33216-2014. *Руководство по содержанию и уходу за лабораторными животными. Правила содержания и ухода за лабораторными грызунами и кроликами* (2016). Получено из: https://protect.gost.ru/document.aspx?control=7&id=202426 (дата обращения: 02.09.2024).
12. Рыбакова, А. В., Макарова, М. Н., Кухаренко, А. Е., Вичаре, А. С., & Рюффер, Ф.-Р. (2018). Существующие требования и подходы к дозированию

лекарственных средств лабораторным животным. *Регулярные исследования и экспертиза лекарственных средств*, *8*(4), 207–217. https://doi.org/10.30895/1991-2919-2018-8-4-207-217. EDN: https://elibrary.ru/MIBSDR

13. Хабриев, Р. У. (2005). *Руководство по экспериментальному (доклиническому) изучению новых фармакологических веществ* (832 с.). ISBN: 5-225-04219-8. EDN: https://elibrary.ru/QCIIOB
14. Cai, E., Wu, R., Wu, Y., Gao, Y., Zhu, Y., & Li, J. (2024). A systematic review and meta-analysis on the current status of anthelmintic resistance in equine nematodes: a global perspective. *Molecular and Biochemical Parasitology*, *257*, 111600. https://doi.org/10.1016/j.molbiopara.2023.111600. EDN: https://elibrary.ru/KPCCES
15. Esfahani, M. K. M., Alavi, S. E., Cabot, P. J., Islam, N., Izake, E. L., Koohi, M., et al. (2021). PEGylated mesoporous silica nanoparticles (MCM-41): a promising carrier for the targeted delivery of fenbendazole into prostate cancer cells. *Pharmaceutics*, *13*, 1605. https://doi.org/10.3390/pharmaceutics13101605. EDN: https://elibrary.ru/IFDDTY
16. Khalikov, S. S., Lokshin, B. V., Ilyin, M. M., Varlamova, A. I., Musaev, M. B., & Arhipov, A. I. (2019). Methods for obtaining solid dispersions of drugs and their properties. *Russian Chemical Bulletin*, *68*(10), 1924–1932. https://doi.org/10.1007/s11172-019-2648-3. EDN: https://elibrary.ru/GVFLDV
17. Khalikov, S. S. (2021). Mechanochemical technology for regulation of the solubility of anthelmintic drugs by using polymers. *INEOS OPEN*, *4*(2), 53–60. https://doi.org/10.32931/io2108r. EDN: https://elibrary.ru/JOFSUX
18. Lu, M., Wei, W., Xu, W., Polyakov, N. E., Dushkin, A. V., & Su, W. (2022). Preparation of DNC solid dispersion by a mechanochemical method with glycyrrhizic acid and polyvinylpyrrolidone to enhance bioavailability and activity. *Polymers*, *14*(10), 2037. https://doi.org/10.3390/polym14102037. EDN: https://elibrary.ru/WWQSPD
19. Melian, M. E., Paredes, A. J., Munguía, B., Colobbio, M., Ramos, J. C., Teixeira, R., et al. (2020). Nanocrystals of novel valerolactam-fenbendazole hybrid with improved in vitro dissolution performance. *AAPS PharmSciTech*, *21*, 1777. https://doi.org/10.1208/s12249-020-01777-y. EDN: https://elibrary.ru/DIQUWF
20. Nielsen, M. K. (2022). Anthelmintic resistance in equine nematodes: current status and emerging trends. *International Journal for Parasitology: Drugs and Drug Resistance*, *20*(September), 76–88. https://doi.org/10.1016/j.ijpddr.2022.10.005. EDN: https://elibrary.ru/NNLLTJ
21. Riviere, J. E., & Papich, M. G. (2009). *Veterinary pharmacology and therapeutics* (9th ed., 1216 p.). Hoboken, NJ: Wiley-Blackwell.

22. Sun, Y., Chen, D., Pan, Y., Qu, W., Hao, H., Wang, X., et al. (2019). Nanoparticles for antiparasitic drug delivery. *Drug Delivery*, *26*(1), 1206–1221. https://doi.org/10.1080/10717544.2019.1692968. EDN: https://elibrary.ru/ELCXZU
23. Wiegand, H., & Finney, D. J. (1971). *Probit analysis* (3rd ed., XV, 333 pp.). Cambridge: Cambridge University Press. *Biometrical Journal*, *14*(1), 72 (1972). https://doi.org/10.1002/bimj.19720140111

References

1. Arkhipov, I. A. (2009). *Anthelmintics: pharmacology and application* (pp. 47–55). Moscow: Russian Academy of Agricultural Sciences. ISBN: 978-5-85941-305-8. EDN: https://elibrary.ru/QLTSHX
2. Arkhipov, I. A., Varlamova, A. I., Khalikov, S. S., Sadov, K. M., & Dushkin, A. V. (2020). Effect of mechanochemical technology on the anthelmintic efficacy of supramolecular complexes of fenbendazole with licorice extract. *Russian Journal of Parasitology*, *14*(1), 70–74. https://doi.org/10.31016/1998-8435-2020-14-1-70-74. EDN: https://elibrary.ru/DKQINK
3. Varlamova, A. I., Arkhipov, I. A., Khalikov, S. S., & Sadov, K. M. (2019). Efficacy of fenbendazole based on a nanoscale supramolecular delivery system with polyvinylpyrrolidone and sodium dioctyl sulfosuccinate against helminth infections. *Russian Journal of Parasitology*, *13*(1), 56–63. https://doi.org/10.31016/1998-8435-2019-13-1-56-63. EDN: https://elibrary.ru/IVVHJM
4. Varlamova, A. I., Limova, Yu. V., Sadov, K. M., Sadova, A. K., Belova, E. E., Radionov, A. V., Khalikov, S. S., Chistichenko, Yu. S., Dushkin, A. V., Skira, V. N., & Arkhipov, I. A. (2016). Efficacy of a supramolecular complex of fenbendazole against nematodes in sheep. *Russian Journal of Parasitology*, *(1)*, 76–81. https://doi.org/10.12737/18364. EDN: https://elibrary.ru/VQVDSP
5. Varlamova, A. I., & Arkhipov, I. A. (2020). Biological activity of fenbendazole based on a supramolecular delivery system with disodium salt of glycyrrhizic acid. *Agricultural Biology*, *55*(4), 830–842. https://doi.org/10.15389/agrobiology.2020.4.830rus. EDN: https://elibrary.ru/AICXPB
6. Varlamova, A. I., & Arkhipov, I. A. (2020). Comparative acute toxicity of supramolecular complexes of fenbendazole using different polymers for targeted delivery. *Russian Journal of Parasitology*, *14*(2), 83–87. https://doi.org/10.31016/1998-8435-2020-14-2-83-87. EDN: https://elibrary.ru/CBLONP
7. Varlamova, A. I., Movsesyan, S. O., Arkhipov, I. A., Khalikov, S. S., Arisov, M. V., Kochetkov, P. P., et al. (2020). Biological activity and pharmacokinetic features of fenbendazole based on a supramolecular targeted delivery system with licorice extract and sodium dioctyl sulfosuccinate. *Proceedings of*

the Russian Academy of Sciences. Biological Series, *(6)*, 565–574. https://doi.org/10.31857/S0002332920060132. EDN: https://elibrary.ru/GBPKFA

8. European Convention for the Protection of Vertebrate Animals Used for Experimental and Other Scientific Purposes (1986). Retrieved from: https://base.garant.ru/4090914/ (accessed: 01.09.2024).
9. Isakova, M. N., Krasnoperov, A. S., Drozdova, L. I., Shkuratova, I. A., & Khonina, T. G. (2023). Study of chronic toxicity of a pharmacological composition based on bacteriocin nisin and silicon glycerolates. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *15*(4), 112–135. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2023-15-4-112-135. EDN: https://elibrary.ru/SRZSNT
10. Medvedeva, E. N., Babkin, V. A., & Ostroukhova, L. A. (2003). Larch arabinogalactan — properties and prospects of use (review). *Chemistry of Plant Raw Material*, *(1)*, 27–37. EDN: https://elibrary.ru/HYPXOB
11. GOST 33216-2014. Guidelines for the care and maintenance of laboratory animals. Rules for the maintenance and care of laboratory rodents and rabbits (2016). Retrieved from: https://protect.gost.ru/document.aspx?control=7&id=202426 (accessed: 02.09.2024).
12. Rybakova, A. V., Makarova, M. N., Kukharenko, A. E., Vichare, A. S., & Rüffer, F. R. (2018). Current requirements and approaches to dosing of drugs in laboratory animals. *Regular Studies and Examination of Medicines*, *8*(4), 207–217. https://doi.org/10.30895/1991-2919-2018-8-4-207-217. EDN: https://elibrary.ru/MIBSDR
13. Khabriev, R. U. (2005). *Guidelines for experimental (preclinical) study of new pharmacological substances* (832 pp.). ISBN: 5-225-04219-8. EDN: https://elibrary.ru/QCIIOB
14. Cai, E., Wu, R., Wu, Y., Gao, Y., Zhu, Y., & Li, J. (2024). A systematic review and meta-analysis on the current status of anthelmintic resistance in equine nematodes: a global perspective. *Molecular and Biochemical Parasitology*, *257*, 111600. https://doi.org/10.1016/j.molbiopara.2023.111600. EDN: https://elibrary.ru/KPCCES
15. Esfahani, M. K. M., Alavi, S. E., Cabot, P. J., Islam, N., Izake, E. L., Koohi, M., et al. (2021). PEGylated mesoporous silica nanoparticles (MCM-41): a promising carrier for the targeted delivery of fenbendazole into prostate cancer cells. *Pharmaceutics*, *13*, 1605. https://doi.org/10.3390/pharmaceutics13101605. EDN: https://elibrary.ru/IFDDTY
16. Khalikov, S. S., Lokshin, B. V., Ilyin, M. M., Varlamova, A. I., Musaev, M. B., & Arhipov, A. I. (2019). Methods for obtaining solid dispersions of drugs and their properties. *Russian Chemical Bulletin*, *68*(10), 1924–1932. https://doi.org/10.1007/s11172-019-2648-3. EDN: https://elibrary.ru/GVFLDV

17. Khalikov, S. S. (2021). Mechanochemical technology for regulation of the solubility of anthelmintic drugs by using polymers. *INEOS OPEN*, *4*(2), 53–60. https://doi.org/10.32931/io2108r. EDN: https://elibrary.ru/JOFSUX
18. Lu, M., Wei, W., Xu, W., Polyakov, N. E., Dushkin, A. V., & Su, W. (2022). Preparation of DNC solid dispersion by a mechanochemical method with glycyrrhizic acid and polyvinylpyrrolidone to enhance bioavailability and activity. *Polymers*, *14*(10), 2037. https://doi.org/10.3390/polym14102037. EDN: https://elibrary.ru/WWQSPD
19. Melian, M. E., Paredes, A. J., Munguía, B., Colobbio, M., Ramos, J. C., Teixeira, R., et al. (2020). Nanocrystals of novel valerolactam-fenbendazole hybrid with improved in vitro dissolution performance. *AAPS PharmSciTech*, *21*, 1777. https://doi.org/10.1208/s12249-020-01777-y. EDN: https://elibrary.ru/DIQUWF
20. Nielsen, M. K. (2022). Anthelmintic resistance in equine nematodes: current status and emerging trends. *International Journal for Parasitology: Drugs and Drug Resistance*, *20*(September), 76–88. https://doi.org/10.1016/j.ijpddr.2022.10.005. EDN: https://elibrary.ru/NNLLTJ
21. Riviere, J. E., & Papich, M. G. (2009). *Veterinary pharmacology and therapeutics* (9th ed., 1216 p.). Hoboken, NJ: Wiley-Blackwell.
22. Sun, Y., Chen, D., Pan, Y., Qu, W., Hao, H., Wang, X., et al. (2019). Nanoparticles for antiparasitic drug delivery. *Drug Delivery*, *26*(1), 1206–1221. https://doi.org/10.1080/10717544.2019.1692968. EDN: https://elibrary.ru/ELCXZU
23. Wiegand, H., & Finney, D. J. (1971). *Probit analysis* (3rd ed., XV, 333 pp.). Cambridge: Cambridge University Press. *Biometrical Journal*, *14*(1), 72 (1972). https://doi.org/10.1002/bimj.19720140111

ВКЛАД АВТОРОВ

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку статьи для публикации.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

The authors contributed equally to this article.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Дёмкина Ольга Владимировна, кандидат ветеринарных наук, доцент кафедры ветеринарно-санитарной экспертизы, эпизоотологии и микробиологии

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный государственный аграрный университет»

ул. Политехническая, 86, г. Благовещенск, 675005, Российская Федерация
demkina-olsen@mail.ru

Халиков Салават Самадович, д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории физиологически активных фторорганических соединений
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова РАН
ул. Вавилова, 28, стр. 1, г. Москва, 119334, Российская Федерация
khalikov_ss@ineos.ac.ru

Халиков Марат Салаватович, научный сотрудник лаборатории физиологически активных фторорганических соединений
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова РАН
ул. Вавилова, 28, стр. 1, г. Москва, 119334, Российская Федерация
marat1988@ineos.ac.ru

Ильин Михаил Михайлович, канд. хим. наук, научный сотрудник лаборатории стереохимии сорбционных процессов
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова РАН
ул. Вавилова, 28, стр. 1, г. Москва, 119334, Российская Федерация
kotosok@yandex.ru

Карамушкина Светлана Владимировна, кандидат биологических наук, доцент кафедры физиологии, этологии и биохимии
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Российский государственный аграрный университет – Московская сельскохозяйственная академия имени К.А. Тимирязева
ул. Тимирязевская, 49, г. Москва, 127434, Российская Федерация
Sveta.vetmed@mail.ru

DATA ABOUT THE AUTHORS

Olga V. Demkina, Candidate of Veterinary Sciences, Associate Professor of the Department of Veterinary and Sanitary Examination, Epizootology and Microbiology

Far Eastern State Agrarian University
86, Polytechnicheskaya Str., Blagoveshchensk, 675005, Russian Federation
demkina-olsen@mail.ru
SPIN-code: 4628-1555
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9303-4100
Researcher ID: KYP-3060-2024

Salavat S. Khalikov, Doctor of Engineering Sciences, Leading Researcher of the Laboratory of Physiologically Active Organofluorine Compounds
A.N. Nesmeyanov Institute of Organoelement Compounds of Russian Academy of Sciences
28, Vavilov Str., Bldg. 1, Moscow, 119334, Russian Federation
khalikov_ss@ineos.ac.ru
SPIN-code: 8931-8242
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4736-5934
Researcher ID: T-2164-2018
Scopus Author ID: 57190865687

Marat S. Khalikov, Researcher of the Laboratory of Physiologically Active Organofluorine Compounds
A.N. Nesmeyanov Institute of Organoelement Compounds of Russian Academy of Sciences
28, Vavilov Str., Bldg. 1, Moscow, 119334, Russian Federation
marat1988@ineos.ac.ru
SPIN-code: 1937-9902
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1768-5048
Scopus Author ID: 602304510

Mikhail M. Ilyin, PhD in Chemistry, Research Associate at the Laboratory of Stereochemistry of Sorption Processes
A.N. Nesmeyanov Institute of Organoelement Compounds of Russian Academy of Sciences
28, Vavilov Str., Bldg. 1, Moscow, 119334, Russian Federation
kotosok@yandex.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0214-8573
Researcher ID: AAN-9022-2020
Scopus Author ID: 6602736683

Svetlana V. Karamushkina, Ph.D. in Biology, Associate Professor, Department of Physiology, Ethology and Biochemistry
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Russian State Agrarian University - K.A. Timiryazev Moscow Agricultural Academy
49, Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russian Federation
Sveta.vetmed@mail.ru
SPIN-code: 4828-4148
ORCID: https://orcid.org/0009-0009-6485-7146
ResearcherID: LIH-0675-2024

Поступила 25.12.2024
После рецензирования 01.02.2025
Принята 13.02.2025

Received 25.12.2024
Revised 01.02.2025
Accepted 13.02.2025

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-4-1234 **EDN: SJLFAJ**
УДК 636.2.03:575

CC BY NC ND

Научная статья

МОНИТОРИНГ ГЕНЕТИЧЕСКОГО ПОЛИМОРФИЗМА ДНК-МАРКЕРОВ ПРОДУКТИВНОСТИ МОЛОЧНОГО СКОТА

И.П. Иванова, Е.Н. Юрченко, Ю.А. Оконешникова

Аннотация

Обоснование. Традиционные системы улучшения молочного скота требуют значительных ресурсов и не отличаются высокой эффективностью. Отбор с учетом ДНК маркеров позволяет оптимально формировать стада. Мониторинг генетического полиморфизма генов ассоциированных с улучшенными качествами молочного скота является основой для коррекции программ селекции.

Цель. Изучить генотипические особенности популяций молочного скота Омской области.

Материалы и методы. Объект исследования - генотипы коров красной степной и черно-пестрой пород. Мониторинг полиморфизма генов проводился на основании генетических паспортов коров с 2020 по 2024 гг. Количество генотипов коров в мониторинге - 356 голов. Генотипирование проводилось в лабораториях KSITEST, г. Москва и в ФГБОУ ВО «ГАУ Северного Зауралья», г. Тюмень. Определялись SNP по генам CSN_2, LGB, GH.

Результаты. Наибольший удельный вес в популяции имеет аллель A_1, гена CSN_2, от 40 % в красной степной породе и до 45 % в черно-пестрой. Наименьшую частоту встречаемости в черно-пестрой породе у аллеля F – 0,71 %. Доля гомозигот CSN_2^{A2A2} в красной степной породе - 23,33 %, что выше, чем в черно-пестрой породе на 6,18 %. Частота встречаемости аллеля А гена LGB у коров черно-пестрой породы составила 62,14 % и 51,67 % у красной степной породы. С 2022 по 2024 гг. частота желательного аллеля, гена CSN_2 снизилась на 0,06 – 0,07. Частота желательного аллеля GH и LGB увеличилась в 2024 г в двух популяциях. Генетическая основа популяции практически не изменилась за период 2022-2024 гг., что свидетельствует об отсутствии селекционного давления по ДНК-маркерам.

Заключение. Популяция молочного скота в Омской области характеризуется высоким генетическим разнообразием по генам-маркерам молочной

продуктивности, а регулярный мониторинг генетической структуры пород позволит оптимизировать селекционный процесс.

Ключевые слова: полиморфизм; молочная продуктивность; ДНК-маркер; селекция

Для цитирования. Иванова, И. П., Юрченко, Е. Н., & Оконешникова, Ю. А. (2025). Мониторинг генетического полиморфизма ДНК-маркеров продуктивности молочного скота. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(4), 206-222. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-4-1234

Original article

MONITORING OF GENETIC POLYMORPHISM OF DNA MARKERS OF DAIRY CATTLE PRODUCTIVITY

I.P. Ivanova, E.N. Yurchenko, Yu.A. Okoneshnikova

Abstract

Background. Traditional dairy cattle improvement systems require significant resources and are not highly efficient. Selection based on DNA markers makes it possible to optimally form herds. Monitoring of genetic polymorphism of genes associated with improved qualities of dairy cattle is the basis for correction of breeding programs.

Purpose. To study the genotypic features of dairy cattle populations in the Omsk region.

Materials and methods. The object of the study is the genotypes of cows of the red steppe and black-mottled breeds. Monitoring of gene polymorphism was carried out on the basis of genetic passports of cows from 2020 to 2024. The number of genotypes of cows in the monitoring is 356 heads. Genotyping was carried out in the laboratories of KSITEST, Moscow and in the Federal State Budgetary Educational Institution "GAU Northern Trans-Urals", Tyumen. SNPs have been determined by the CSN_2, LGB, and GH genes.

Results. The A1 allele, the CSN_2 gene, has the highest proportion in the population, from 40% in the red steppe breed and up to 45% in the black-mottled one. The lowest frequency of occurrence in the black-and–white breed in the F allele is 0.71%. The proportion of CSN_2^{A2A2} homozygotes in the red steppe breed is 23.33%, which is higher than in the black-mottled breed by 6.18%. The frequency of occurrence of the allele A of the LGB gene in black-and-white cows was 62.14% and

51.67% in the red steppe breed. From 2022 to 2024, the frequency of the desired allele of the CSN_2 gene decreased by 0.06 – 0.07. The frequency of the desired allele of GH and LGB increased in 2024 in two populations. The genetic basis of the population has practically not changed over the period 2022-2024, which indicates the absence of breeding pressure, taking into account DNA markers.

Conclusion. Dairy cattle populations in the Omsk region are characterized by high genetic diversity in terms of genes-markers of dairy productivity, and regular monitoring of the genetic structure of breeds will optimize the breeding process.

Keywords: polymorphism; milk productivity; DNA marker; breeding

For citation. Ivanova, I. P., Yurchenko, E. N., & Okoneshnikova, Yu. A. (2025). Monitoring of genetic polymorphism of DNA markers of dairy cattle productivity. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(4), 206-222. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-4-1234

Введение

Молочное скотоводство занимает ключевые позиции в аграрном секторе многих стран, обеспечивая не только продовольственную безопасность, но и значительный вклад в экономику сельских территорий [1; 15; 18]. С увеличением спроса на молочные продукты данная отрасль сталкивается как с новыми вызовами, так и возможностями для устойчивого развития. В Российской Федерации молочное скотоводство является одной из наиболее важных подотраслей сельскохозяйственного производства, поскольку молоко является стратегически важным продуктом в потребительской корзине россиян [11; 12]. Использование современных популяционно-генетических и геномных технологий повышения эффективности производства молока, улучшения его качественных характеристик, а также получение отечественного племенного материала обеспечивают базис продовольственной безопасности страны [13].

Основным приоритетом в масштабах страны является формирование лучшего генофонда крупного рогатого скота молочного направления продуктивности [2; 4; 11]. Достижение высокого уровня племенной и хозяйственной ценности популяции молочного скота обусловлено оптимальным использованием наиболее ценных особей, их генотипов в воспроизводстве, о чем свидетельствуют результаты Л.Н. Чижова (2020), Ю.В. Исуповой и Е.В. Ачасовой (2021), И.М. Дунина (2024), A. Kharzhau, Y.A. Baturgaliev, N.V. Bogolybova (2023). Для создания высокопродуктивных стад молочного скота при сокращении периода селекционной оценки и повышения ее точности необходимо учитывать генетическую основу продуктивных ка-

честв животных [14; 16; 17; 19]. В сравнении с традиционными методами селекции в стадах крупного рогатого скота такой подход позволяет получить экономический эффект значительно раньше и будет способствовать селекционному прогрессу в популяции [6; 9; 10; 20]. В связи с этим важно обеспечить научно-обоснованную концепцию селекционно-племенной работы и сохранения отечественного генофонда красной степной и черно пестрой пород, разводимых в Омской области.

Изучение полиморфизма генов ассоциированных с продуктивными качествами и хозяйственно-полезными признаками позволяет определить генетическое разнообразие популяции и использовать полученные данные при организации селекционной работы с животными [7; 8]. Современная маркерная селекция выделяет несколько аллелей генов и гормонов, по наличию которых можно спрогнозировать продуктивные качества каждой оцениваемой особи [5].

Молочная продуктивность крупного рогатого скота формируется путем сложного взаимодействия генотипа и внешней среды. Полигенный тип наследования количественных признаков, к которым относится и молочная продуктивность, затрудняет селекцию крупного рогатого скота, так как увеличивается число параметров отбора. В связи с этим определение генетической структуры популяции будет способствовать сохранению генофонда и переходу к эффективным методам селекции [3]. Использование результатов мониторинга генетического полиморфизма по генам-маркерам молочной продуктивности в популяции молочного скота приведет к созданию оптимальных селекционных программ, которые будут способствовать развитию отечественного животноводства.

Цель исследования заключается в изучении генотипических особенностей популяций красного степного и черно-пестрого скота Омской области.

Основными *задачами исследования* определены:

- изучить полиморфизм ДНК маркеров продуктивности (CSN_2, LGB, GH) в популяциях молочного скота;

- провести сравнительный анализ генетической структуры популяций в пределах двух генераций.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования были генотипы коров красной степной и черно-пестрой пород. Исследования проведены в ООО «Рассвет» и АО «Азовское» Омской области с общим поголовьем 1520 голов. Для гено-

типирования были сформированы 2 группы коров в зависимости от породной принадлежности. На основании анализа родословных животных устанавливалась кровность по основной породе. Коров с кровностью до 75 % по красной степной или черно-пестрой породе включали в отобранную группу для определения их генотипа.

Мониторинг генетического полиморфизма проводился на основании данных о генотипировании коров в период с 2020 по 2024 гг. общее количество генотипов крупного рогатого скота учтенных в мониторинге генетического полиморфизма составило 356 голов. Определение генотипов проводилось в лаборатории молекулярно-генетической экспертизы KSITEST ООО «Ксивелью», г. Москва (2024 г) и в Центре геномных технологий ФГБОУ ВО «ГАУ Северного Зауралья», г. Тюмень (2020 г).

Молекулярно-биологические исследования биологических образцов животных (жидкая кровь, волосяной выщип) проводились с применением классических методов, согласно инструкции фирм производителей коммерческих наборов с определением однонуклеотидных полиморфизмов (SNP) по генам CSN_2, LGB, GH.

Исследование проводилось на основе изучения данных с использованием аналитического, статистического, лабораторного методов и ДНК-тестирования.

Статистическую обработку полученных данных проводили с использованием программы Statistica, оценку достоверности – по критерию Стьюдента. Уровень значимости устанавливался равным 0,05.

Результаты исследования

Ген бета-казеина имеет 12 аллельных вариантов, но в популяции молочного скота Омской области встречаются не все. Установлено, что популяция коров по гену бета-казеина CSN_2 имеется высокое разнообразие (рис. 1).

Генофонд исследуемого поголовья по гену CSN_2 характеризуется пятью аллельными вариантами. Наибольший удельный вес в популяции имеет аллель A_1, от 40 % в красной степной породе и до 45 % в черно-пестрой породе.

Исследуемые популяции имеют сходную структуру полиморфизма гена CSN_2. Аллель A_2, так же встречается достаточно часто, у 46,67 % поголовья красного степного скота и 40,71 % среди черно-пестрого. Наименьшую частоту встречаемости в популяции черно-пестрого скота имеет аллель F – 0,71 %.

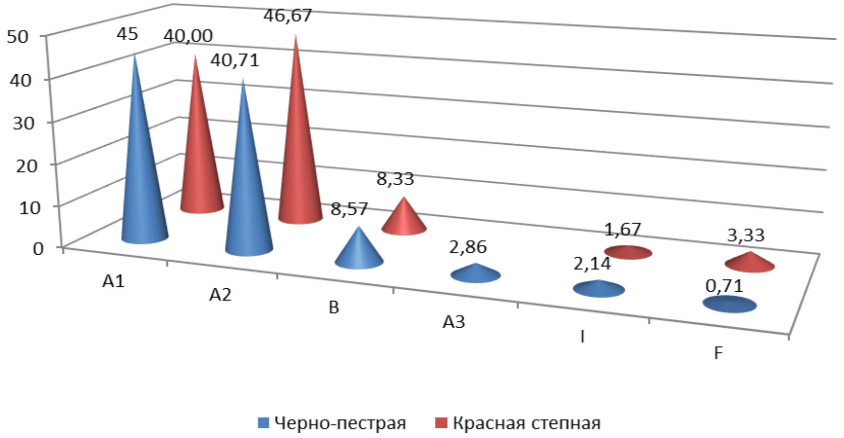


Рис. 1. Частота аллелей гена CSN_2

В генофонде красной степной породы аллель F встречается на 2,62 % чаще, чем в черно-пестрой. Коров с аллелем A_3 гена CSN_2 среди красной степной породы не выявлено.

Для получения молока с улучшенными технологическими качествами молочного белка наиболее предпочтительным является генотип по бета-казеину CSN_2^{A2A2}. Доля коров в популяции красной степной породы являющихся гомозиготами с наиболее желательным генотипом CSN_2^{A2A2} составила 23,33 %, что выше, чем в популяции коров черно-пестрой породы на 6,18 % (рис. 2).

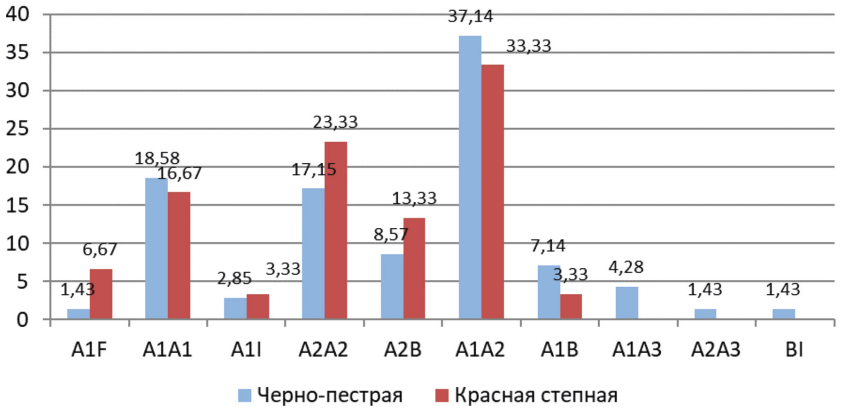


Рис. 2. Полиморфизм гена CSN_2

В популяции коров красной степной породы выявлено 7 различных генотипов гена CSN_2. Большим полиморфизмом гена CSN_2 обладает черно-пестрая порода, выявлено 10 встречающихся генотипов. Наибольший удельный вес в популяции приходится на гетерозигот CSN_2^{A1A2}. Частота встречаемости носителей ассоциированного аллеля с продуктивностью в популяциях черно-пестрого и красного степного скота находится в пределах 46,66 – 47,14%. Носители аллеля A_2 имеют генотипы CSN_2^{A1A2}, CSN_2^{A2B} и CSN_2^{A2A3}.

Таким образом, генетическое разнообразие исследуемых популяций по гену бета-казеина (CSN_2) позволяет использовать оптимальные генотипы в системе разведения и совершенствовать поголовье по технологическим характеристикам молока. Среди коров черно-пестрой породы Омской области 64,29% и 69,99% животных красной степной породы способны передать потомству желательный алелль A_2 гена CSN_2.

Полиморфизм гена LGB находится в сбалансированном состоянии. А-аллель встречается чаще в популяциях, чем аллель В. Частота встречаемости аллеля А гена LGB у коров черно-пестрой породы составила 62,14% и 51,67% у коров красной степной породы (рис. 3).

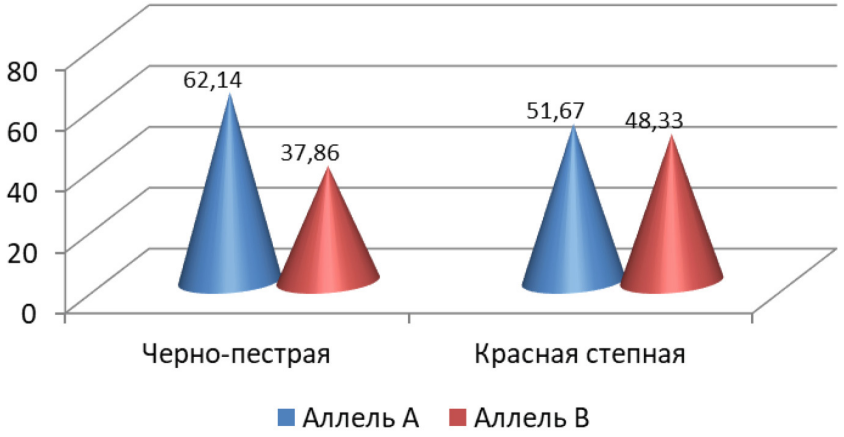


Рис. 3. Частота встречаемости аллелей LGB

Наиболее желательный В-аллель для селекции коров на улучшение технологических характеристик молока встречается в популяции красной степной породы чаще на 10,47 %.

На рисунке 4 представлен полиморфизм генотипов гена LGB.

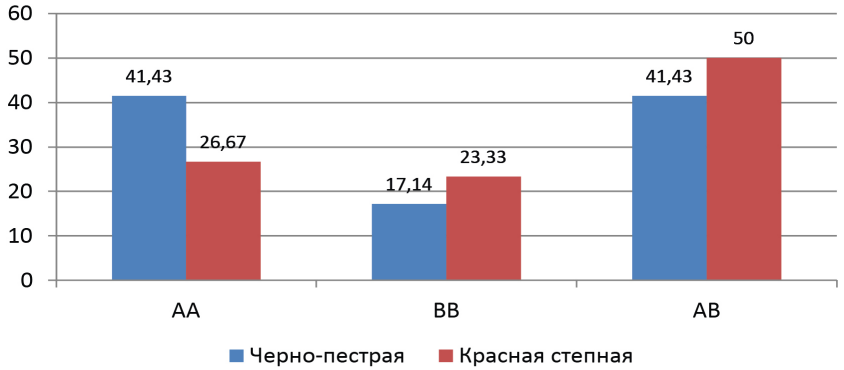


Рис. 4. Полиморфизм гена лактоглобулина

Генотип LGB^{BB} встречается у 17,14 % коров черно-пестрой породы, что на 6,19 % реже, чем доля гомозигот с генотипом LGB^{BB} в красной степной породе. Половина коров в популяции красной степной породы являются носителями желательного аллеля В и имеют генотип LGB^{AB}. Для коров черно-пестрой породы на долю гетерозигот с генотипом LGB^{AB} приходится 41,43 % . Частота встречаемости генотипов LGB^{AA} в черно-пестрой и красной степной породах составила 41,43 % и 26,46 % соответственно.

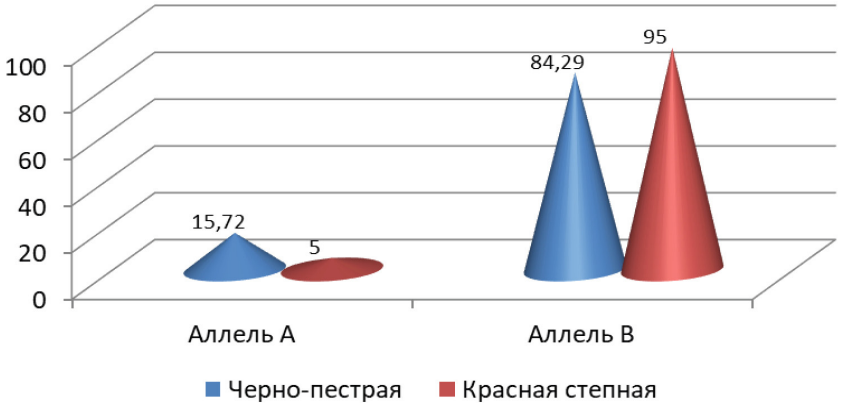


Рис. 5. Частота встречаемости аллелей гормона роста (ген GH)

Гормон роста – соматотропин, регулирует в организме животного обменные процессы, репродуктивную функцию и лактацию, поэтому в се-

лекции используется в качестве ДНК-маркера. На рисунке 5 представлен полиморфизм гена GH.

Частота аллеля В в популяциях значительно превосходит частоту А-алелля. Доля аллеля В в генетической структуре черно-пестрой породы составила 84,29 %, и 95 % в структуре генофонда красной степной породы. Частота встречаемости А-аллеля в популяции коров черно-пестрой породы составила 15,72 %, что на 10,72 % больше, чем в красной степной породе.

Полиморфизм генотипов показал, что 90 % коров красной степной породы имеют генотип GH^{BB}. В популяции черно-пестрого скота 68,57 % особей с генотипом $GH1^{BB}$ (рис. 6).

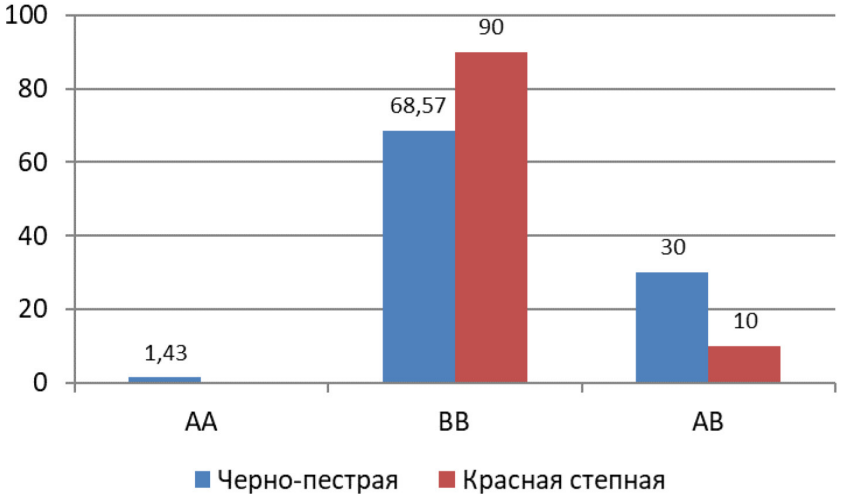


Рис. 6. Полиморфизм гена GH

Наиболее желательным является В-аллель гена GH. 100 % исследуемого поголовья красного степного скота имеют желательный аллель в своем генотипе. На долю гетерозигот с генотипом GH^{AB} приходится 10 % коров красной степной породы и 30 % коров черно-пестрой породы. В популяции черно-пестрого скота отмечено минимальное количество особей с генотипом GH^{AA}.

Мониторинг генетического полиморфизма по генам бета-казеина, бета-лактоглобулина и гормона соматотропина показал как положительную, так и отрицательную динамику частоты встречаемости желательных аллелей в популяциях (рис. 7).

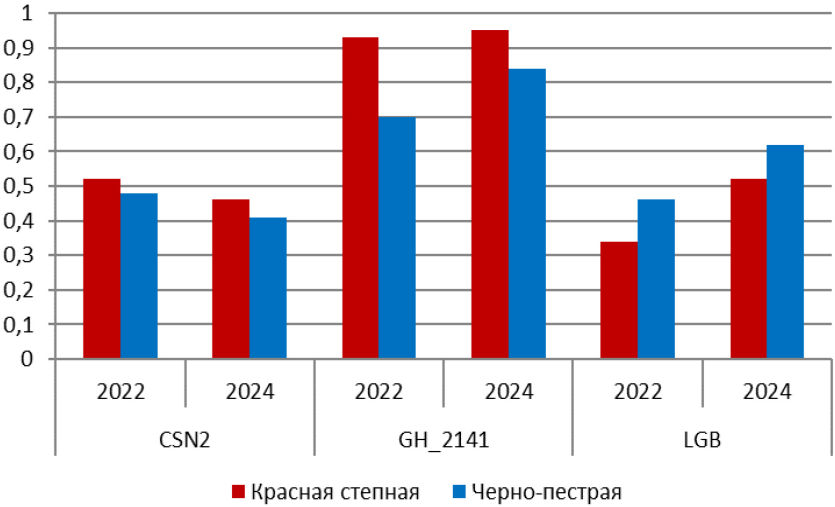


Рис. 7. Мониторинг генетического полиморфизма в популяции коров

За период с 2022 по 2024 гг. частота желательного аллеля, гена каппа-казеина снизилась не значительно (разница в пределах 0,06 – 0,07).

Частота желательного аллеля соматотропина и бета-лактоглобулина увеличилась в 2024 г в популяции как красной степной, так и черно-пестрой пород.

В целом мониторинг генетического полиморфизма показал, что генетическая основа популяции практически не изменилась за период 2022-2024 гг., что свидетельствует об отсутствии селекционного давления на популяции по ДНК-маркерам.

Обсуждение

О.А. Скачкова (2022) и другие исследователи рекомендуют использовать в селекции генетические маркеры молочной продуктивности. Имеющаяся частота встречаемости желательных аллелей позволяет вести направленную селекционную работу. Современные исследования Н. Попова (2022), Е. Можаева, В. Шафирова, Н. Сердюка (2020), О.О. Гетокова, М.М. Шахмурзова, А.Ф. Шевхужева, Д.Р. Смакуев (2020) демонстрируют значительный эффект в молочном скотоводстве при использовании геномной селекции. По мнению многих исследователей, методы геномной селекции являются наиболее перспективными для устойчивого развития

молочного скотоводства. Таким образом, мониторинг генетического полиморфизма генов маркеров молочной продуктивности в Омской области не противоречит данным других исследователей и является перспективным направлением, позволяющим усовершенствовать селекционный процесс в молочном скотоводстве.

Заключение

В результате проведенных исследований представлен анализ мониторинга генетического полиморфизма по генам, ассоциированным с улучшением качественных характеристик молока крупного рогатого скота в Омской области. Результаты данной работы имеют большое практическое значение, поскольку отбор животных для разведения с учетом генотипов будет способствовать улучшению биологических характеристик коров в регионе.

Заключение комитета по этике. Исследование проводили в соответствии с требованиями Европейской конвенции о защите позвоночных животных, используемых для экспериментов или в научных целях (ETS № 123, Страсбург, 1986) и Приказа МЗ РФ № 708 Н от 28 августа 2010 г.

Информация о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация о спонсорстве. Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства сельского хозяйства Российской Федерации № 124053100054-5.

Список литературы

1. Дерюгина, А. В., Иващенко, М. Н., Метелин, В. Б. и др. (2023). Влияние технологического стресса на неспецифическую резистентность организма коров. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *15*(3), 26–40. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2023-15-3-26-40. EDN: https://elibrary.ru/RJKSHF
2. Дунин, И. М., Тяпугин, С. Е., Семенова, Н. В. и др. (2024). Эффективность селекции молочного скота при использовании различных методов прогноза племенной ценности. *Молочное и мясное скотоводство*, (2), 3–5. https://doi.org/10.33943/MMS.2024.18.25.001. EDN: https://elibrary.ru/VEEIZS
3. Иванова, И. П. (2024). Генетические особенности коров голштинской породы в Омской области. *Вестник Омского государственного аграрного университета*, (3(55)), 74–79. EDN: https://elibrary.ru/HSXABJ

4. Исупова, Ю. В., & Ачкасова, Е. В. (2021). Перспективы использования оценки геномной племенной ценности в селекции молочного скота в условиях Удмуртской Республики. *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*, (4(90)), 307–311. EDN: https://elibrary.ru/YYBQKA
5. Карымсаков, Т. Н. (2021). Эффективность использования в селекции молочного скота методов индексной оценки. *Вестник аграрной науки*, (3(90)), 89–93. https://doi.org/10.17238/issn2587-666X.2021.3.89. EDN: https://elibrary.ru/LWHGIU
6. Олейник, С. А., Скрипкин, В. С., Лесняк, А. В. и др. (2023). Сравнительный анализ жирнокислотного состава молока коров красной степной породы в условиях разных природно-климатических зон Северного Кавказа. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *15*(4), 236–259. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2023-15-4-236-259. EDN: https://elibrary.ru/LZRJFA
7. Попов, Н., Некрасов, А., & Федотова, Е. (2020). Генетическое маркирование в селекции скота. *Животноводство России*, (S2), 9–15. https://doi.org/10.25701/ZZR.2020.47.51.002. EDN: https://elibrary.ru/ZXFJUR
8. Скачкова, О. А., & Бригида, А. В. (2022). Селекция на повышение молочной продуктивности у крупного рогатого скота: значение генетических маркеров-предикторов. *Ветеринария и кормление*, (2), 47–49. https://doi.org/10.30917/ATT-VK-1814-9588-2022-2-13. EDN: https://elibrary.ru/UKKPNR
9. Суров, А. И., Шумаенко, С. Н., Омаров, А. А. и др. (2023). Использование метода генотипирования для отбора животных желательного типа. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *15*(4), 136–157. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2023-15-4-136-157. EDN: https://elibrary.ru/KLDNAL
10. Чижова, Л. Н., Суржикова, Е. С., & Михайленко, Т. Н. (2020). Оценка генетического потенциала молодняка молочного скота по маркерным генам CSN3, GH, PIT-1, PRL. *Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии*, (6), 40–46. EDN: https://elibrary.ru/SWRWQT
11. Шевелева, О. М., Часовщикова, М. А., & Суханова, С. Ф. (2021). Продуктивные и некоторые биологические особенности генофондной породы скота салерс в условиях Западной Сибири. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *13*(1), 156–173. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2021-13-1-156-173. EDN: https://elibrary.ru/GERQEL
12. Barkema, H. W., Von Keyserlingk, M. A. G., Kastelic, J. P., Lam, T. J. G. M., Luby, C., Roy, J. P., Kastelic, & Kelton, D. F. (2015). Invited review: Changes

in the dairy industry affecting dairy cattle health and welfare. *Journal of Dairy Science*, *98*(11), 7426–7445. https://doi.org/10.3168/jds.2015-9377
13. Bijttebier, J., Hamerlinck, J., Moakes, S., Scollan, N., Van Meensel, J., & Lauwers, L. (2017). Low-input dairy farming in Europe: exploring a context-specific notion. *Agricultural Systems*, *156*, 43–51. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.05.016
14. Borusiewicz, A., & Mazur, K. (2017). Environmental and economic conditioning of the breeding of dairy cattle. *Fresenius Environmental Bulletin*, *26*(10), 5824–5832.
15. Galloway, C., Conradie, B., Prozesky, H., & Esler, K. (2018). Opportunities to improve sustainability on commercial pasture-based dairy farms by assessing environmental impact. *Agricultural Systems*, *166*, 1–9. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2018.07.008. EDN: https://elibrary.ru/VHGAEG
16. Kharzhau, A., Batyrgaliyev, Y. A., & Bogolyubova, N. V. (2023). Features of feeding dairy cows of cattle. *Science and Education*, (2–3(71)), 44–51. https://doi.org/10.52578/2305-9397-2023-2-3-44-51. EDN: https://elibrary.ru/XASXYG
17. Naumenkova, V. A., Khrabrova, L. A., & Atroshchenko, M. M. (2023). Analysis of the interconnection of stallion semen indicators with genetic markers of proteins. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *15*(4), 197–209. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2023-15-4-197-209. EDN: https://elibrary.ru/HURKBR
18. Rozhkova-Timina, I. O. (2023). Feed allowance for Holstein cows during lactation and dry periods (Sakhalin island). *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *15*(4), 56–73. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2023-15-4-56-73. EDN: https://elibrary.ru/IHVNLN
19. Sedykh, T. A., Kalashnikova, L. A., Dolmatova, I. Yu., et al. (2023). Developing meat productivity in bull calves of different DGAT1 genotypes. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *15*(3), 155–174. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2023-15-3-155-174. EDN: https://elibrary.ru/XIBFND
20. Sheveleva, O. M., & Bakharev, A. A. (2022). Meat productivity of French-bred bulls due to adaptive technology in Western Siberia. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *14*(4), 370–383. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2022-14-4-370-383. EDN: https://elibrary.ru/BNQCIU

References

1. Deryugina, A. V., Ivashchenko, M. N., Metelin, V. B., et al. (2023). Effect of technological stress on nonspecific resistance of cows' organisms. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *15*(3), 26–40. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2023-15-3-26-40. EDN: https://elibrary.ru/RJKSHF

2. Dunin, I. M., Tyapugin, S. E., Semenova, N. V., et al. (2024). Efficiency of dairy cattle selection using different methods of breeding value prediction. *Milk and Meat Cattle Breeding*, *(2)*, 3–5. https://doi.org/10.33943/MMS.2024.18.25.001. EDN: https://elibrary.ru/VEEIZS
3. Ivanova, I. P. (2024). Genetic characteristics of Holstein cows in Omsk Oblast. *Bulletin of Omsk State Agrarian University*, *(3(55))*, 74–79. EDN: https://elibrary.ru/HSXABJ
4. Isupova, Yu. V., & Achkasova, E. V. (2021). Prospects for using genomic breeding value assessment in dairy cattle selection under conditions of the Udmurt Republic. *Proceedings of Orenburg State Agrarian University*, *(4(90))*, 307–311. EDN: https://elibrary.ru/YYBQKA
5. Karymsakov, T. N. (2021). Efficiency of using index assessment methods in dairy cattle breeding. *Bulletin of Agrarian Science*, *(3(90))*, 89–93. https://doi.org/10.17238/issn2587-666X.2021.3.89. EDN: https://elibrary.ru/LWHGIU
6. Oleynik, S. A., Skripkin, V. S., Lesnyak, A. V., et al. (2023). Comparative analysis of fatty acid composition of milk from Red Steppe cows under different natural and climatic zones of the North Caucasus. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *15*(4), 236–259. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2023-15-4-236-259. EDN: https://elibrary.ru/LZRJFA
7. Popov, N., Nekrasov, A., & Fedotova, E. (2020). Genetic marking in cattle breeding. *Animal Husbandry of Russia*, *(S2)*, 9–15. https://doi.org/10.25701/ZZR.2020.47.51.002. EDN: https://elibrary.ru/ZXFJUR
8. Skachkova, O. A., & Brigida, A. V. (2022). Selection for increased milk productivity in cattle: significance of genetic marker predictors. *Veterinary Medicine and Feeding*, *(2)*, 47–49. https://doi.org/10.30917/ATT-VK-1814-9588-2022-2-13. EDN: https://elibrary.ru/UKKPNR
9. Surov, A. I., Shumaenko, S. N., Omarov, A. A., et al. (2023). Use of genotyping method for selection of animals of desired type. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *15*(4), 136–157. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2023-15-4-136-157. EDN: https://elibrary.ru/KLDNAL
10. Chizhova, L. N., Surzhikova, E. S., & Mikhailenko, T. N. (2020). Assessment of genetic potential of young dairy cattle by marker genes CSN3, GH, PIT1, PRL. *Bulletin of Kursk State Agricultural Academy*, *(6)*, 40–46. EDN: https://elibrary.ru/SWRWQT
11. Sheveleva, O. M., Chasovshchikova, M. A., & Sukhanova, S. F. (2021). Productive and some biological characteristics of the Salers cattle breed gene pool under conditions of Western Siberia. *Siberian Journal of Life Sciences and Ag-*

riculture, *13*(1), 156–173. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2021-13-1-156-173. EDN: https://elibrary.ru/GERQEL

12. Barkema, H. W., Von Keyserlingk, M. A. G., Kastelic, J. P., Lam, T. J. G. M., Luby, C., Roy, J. P., Kastelic, & Kelton, D. F. (2015). Invited review: Changes in the dairy industry affecting dairy cattle health and welfare. *Journal of Dairy Science*, *98*(11), 7426–7445. https://doi.org/10.3168/jds.2015-9377
13. Bijttebier, J., Hamerlinck, J., Moakes, S., Scollan, N., Van Meensel, J., & Lauwers, L. (2017). Low-input dairy farming in Europe: exploring a context-specific notion. *Agricultural Systems*, *156*, 43–51. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.05.016
14. Borusiewicz, A., & Mazur, K. (2017). Environmental and economic conditioning of the breeding of dairy cattle. *Fresenius Environmental Bulletin*, *26*(10), 5824–5832.
15. Galloway, C., Conradie, B., Prozesky, H., & Esler, K. (2018). Opportunities to improve sustainability on commercial pasture-based dairy farms by assessing environmental impact. *Agricultural Systems*, *166*, 1–9. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2018.07.008. EDN: https://elibrary.ru/VHGAEG
16. Kharzhau, A., Batyrgaliyev, Y. A., & Bogolyubova, N. V. (2023). Features of feeding dairy cows of cattle. *Science and Education*, (2–3(71)), 44–51. https://doi.org/10.52578/2305-9397-2023-2-3-44-51. EDN: https://elibrary.ru/XASXYG
17. Naumenkova, V. A., Khrabrova, L. A., & Atroshchenko, M. M. (2023). Analysis of the interconnection of stallion semen indicators with genetic markers of proteins. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *15*(4), 197–209. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2023-15-4-197-209. EDN: https://elibrary.ru/HURKBR
18. Rozhkova-Timina, I. O. (2023). Feed allowance for Holstein cows during lactation and dry periods (Sakhalin island). *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *15*(4), 56–73. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2023-15-4-56-73. EDN: https://elibrary.ru/IHVNLN
19. Sedykh, T. A., Kalashnikova, L. A., Dolmatova, I. Yu., et al. (2023). Developing meat productivity in bull calves of different DGAT1 genotypes. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *15*(3), 155–174. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2023-15-3-155-174. EDN: https://elibrary.ru/XIBFND
20. Sheveleva, O. M., & Bakharev, A. A. (2022). Meat productivity of French-bred bulls due to adaptive technology in Western Siberia. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *14*(4), 370–383. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2022-14-4-370-383. EDN: https://elibrary.ru/BNQCIU

ВКЛАД АВТОРОВ

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку статьи для публикации.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

The authors contributed equally to this article.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Иванова Ирина Петровна, канд. с.-х. наук, доцент, доцент кафедры разведения и генетики сельскохозяйственных животных
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина»
пл. Институтская, 1, г. Омск, 644008, Российская Федерация
ip.ivanova@omgau.org

Юрченко Елена Николаевна, канд. с.-х. наук, доцент, заведующая кафедрой разведения и генетики сельскохозяйственных животных
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина»
пл. Институтская, 1, г. Омск, 644008, Российская Федерация
en.yurchenko@omgau.org

Оконешникова Юлия Андреевна, ассистент кафедры разведения и генетики сельскохозяйственных животных
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина»
пл. Институтская, 1, г. Омск, 644008, Российская Федерация
yua.okontshnikova@omgau.org

DATA ABOUT THE AUTHORS

Irina P. Ivanova, Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Breeding and Genetics of Farm Animals
Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin
1, Institutskaya Square, Omsk, 644008, Russian Federation

ip.ivanova@omgau.org
SPIN-code: 4502-2120
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5700-9186
Scopus Author ID: 57212277573

Elena N. Yurchenko, Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Breeding and Genetics of Farm Animals
Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin
1, Institutskaya Square, Omsk, 644008, Russian Federation
en.yurchenko@omgau.org
SPIN-code: 5242-1428
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7602-8099

Yuliya A. Okoneshnikova, Assistant of the Department of Breeding and Genetics of Farm Animals
Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin
1, Institutskaya Square, Omsk, 644008, Russian Federation
en.yurchenko@omgau.org
SPIN-code: 4889-7952
ORCID: https://orcid.org/0009-0009-3615-6342

Поступила 14.12.2024
После рецензирования 11.01.2025
Принята 23.01.2025

Received 14.12.2024
Revised 11.01.2025
Accepted 23.01.2025

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-4-1207 **EDN: TLZPFZ**
УДК 636.597.084.522

CC BY NC ND

Научная статья

ПОЛИМОРФИЗМ МИКРОСАТЕЛИТНЫХ ЛОКУСОВ КРУПНОГО РОГАТОГО СКОТА ЛИМУЗИНСКОЙ ПОРОДЫ, РАЗВОДИМОГО В РЕСПУБЛИКЕ БАШКОРТОСТАН

Т.А. Седых, Д.И. Гареева, Н.Р. Субханкулов, В.И. Косилов, Д.Н. Зорин, М.Ю. Гладких, М.И. Селионова

Аннотация

Обоснование. Современные молекулярно-генетические технологии позволяют осуществлять мониторинг генетических ресурсов, как на индивидуальном, так и на популяционном уровнях и сокращать сроки генетического совершенствования стад.

Цель исследования – изучение полиморфизма микросателитных локусов у мясного скота лимузинской породы, разводимого на территории Республики Башкортостан. Задачи - изучение полиморфизма микросателитных локусов у скота лимузинской породы, полученного путем поглотительного скрещивания быков лимузинской породы с коровами комбинированного направления продуктивности (симментальская и бестужевская); изучение генетической структуры и показателей генетического разнообразия субпопуляций лимузинского скота.

Материалы и методы. Объект исследования – молодняк лимузинской породы разводимый в стадах, ранее созданных путем поглотительного скрещивания, и принадлежащих хозяйствам - ООО «Мясной союз башкирских производителей» и СПК «Ярославский». Исследования проводилось в генетических лабораториях БГПУ им. М. Акмуллы, ФГБОУ ВО РГАУ МСХА им. К.А. Тимирязева и Башкирского НИИСХ УФИЦ РАН.

Результаты. Установлено, что при анализе 16 STR локусов ДНК крупного рогатого скота лимузинской породы идентифицировано 116 аллелей у I группы животных из стада, где при поглотительном скрещивании материнской основой служила симментальская порода и 74 аллеля - у II группы животных, где материнской основой была бестужевская порода. Число аллелей на один локус у I группы в среднем составило 7,25 у II группы – 4,63. У животных I и II

группы среднее количество эффективных аллелей по локусам составило 4,14 и 3,27. В I группе наблюдаются высокие значения индекса Шенона в локусах TGLA227, BM2113, TGLA53, CSSM66, INRA023. Показатели наблюдаемой и ожидаемой гетерозиготности различаются не значительно. Пространственное расположение генотипов в системе принципиальных координат свидетельствует о том, что изучаемые субпопуляции представляют собой хорошо консолидированные группы, наблюдается сохранение индивидуального генетического разнообразия особей, которые объединены общностью происхождения и принадлежностью к одной породе.

Заключение. Полученные результаты могут быть использованы для рационального использования генетических ресурсов скота лимузинской породы и разработки генетически обоснованных селекционных программ.

Ключевые слова: крупный рогатый скот; микросателиты; фрагментный анализ; полиморфизм; генетическое разнообразие

Для цитирования. Седых, Т. А., Гареева, Д. И., Субханкулов, Н. Р., Косилов, В. И., Зорин, Д. Н., Гладких, М. Ю., & Селионова, М. И. (2025). Полиморфизм микросателлитных локусов крупного рогатого скота лимузинской породы, разводимого в Республике Башкортостан. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(4), 223-249. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-4-1207

Original article

POLYMORPHISM OF MICROSATELLITE LOCI OF CATTLE OF THE LIMOUSINE BREED BRED IN THE REPUBLIC OF BASHKORTOSTAN

T.A. Sedykh, D.I. Gareeva, N.R. Subkhangulov, V.I. Kosilov, D.N. Zorin, M.Yu. Gladkikh, M.I. Selionova

Abstract

Background. Modern molecular genetic technologies make it possible to monitor genetic resources, both at individual and population levels, and reduce the time of genetic improvement of herds.

Purpose. The given research aims to study the polymorphism of microsatellite loci in Limousine beef cattle bred in the Republic of Bashkortostan. The objectives include analysing the polymorphism of microsatellite loci in Limousine cattle, produced by absorptive crossing of Limousine bulls with dual-purpose cows (Simmen-

tal and Bestuzhev) and investigating the genetic structure and indicators of genetic diversity of Limousine cattle subpopulations.

Materials and methods. The research objects are young Limousine cattle of absorptive crossing grown in the limited liability farm "Miasnoi soyuz bashkirskikh proizvoditelei (Meat Union of Bashkir Producers) and SEC Yaroslavsky. The research was conducted in the genetic laboratories of the Bashkir State Pedagogical University named after M. Akmulla, the Federal State Budgetary Educational Institution of the Higher Education the Russian State Agricultural University named after K.A. Timiryazev and Bashkir Agricultural Research Institute of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences.

Results. The analysis of 16 STR loci in Limousine cattle DNA revealed 116 alleles in group I, where the maternal foundation was of the Simmental breed, and 74 alleles in group II, where the maternal foundation was of the Bestuzhev breed. The average number of alleles per locus was 7.25 in group I, and 4.63 in group II. The mean number of effective alleles per locus in groups I and II was 4.14 and 3.27, respectively. Group I exhibited high Shannon index values in the loci TGLA227, BM2113, TGLA53, CSSM66, and INRA023. The observed and expected heterozygosity levels showed no significant differences. The spatial arrangement of genotypes in the principal coordinate system indicated that the studied subpopulations represent well-consolidated groups, with the preservation of individual genetic diversity in individuals, united by common ancestry and belonging to the same breed.

Conclusion. The obtained results can be used for the rational use of genetic resources of cattle of the Limousine breed and the development of genetically based breeding programs.

Keywords: cattle; microsatellites; fragment analysis; polymorphism; genetic diversity

For citation. Sedykh, T. A., Gareeva, D. I., Subkhangulov, N. R., Kosilov, V.I., Zorin, D. N., Gladkikh, M. Yu., & Selionova, M. I. (2025). Polymorphism of microsatellite loci of cattle of the Limousine breed bred in the Republic of Bashkortostan. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(4), 223-249. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-4-1207

Введение

Производство высококачественной говядины, полученной от специализированного мясного скота, является актуальной задачей мясного животноводства.

По статистическим данным в 2021 году доля говядины составляла 14,7% от всей продукции мясного животноводства и занимала 3 место на рынке

мяса. Импорт говядины за 2012-2021 гг. снизился более чем в 3 раза при одновременном росте экспорта. Основными потребителями отечественного мяса являются Китай, Казахстан, Саудовская Аравия. Для увеличения производства говядины в России и снижения доли импортных поставок в стране взят курс на развитие специализированного мясного скотоводства. Но, несмотря на это, производство говядины находится еще на достаточно низком уровне, не позволяя увеличить производство до необходимых объемов [16].

В настоящее время, для увеличения объемов производства высококачественной говядины необходимо рационально использовать генетические ресурсы специализированного мясного скота импортной и отечественной селекции.

Широкое внедрение и практическое использование экономически эффективных систем разведения скота на основе конкурентоспособных мясных пород мирового уровня и имеющихся в отдельных регионах страны малоиспользуемых пастбищных ресурсов позволит в полной мере реализовать наименее затратные ресурсосберегающие технологии производства высококачественной говядины. В то же время, специфика современного российского рынка говядины, в отличие от стран с развитым мясным скотоводством, позволяет на долгосрочной основе существенно наращивать объемы ее производства с опорой на внутренний рынок [2].

В качестве одного из радикальных и результативных приемов ускоренного создания высокопродуктивных стад мясного скота в хозяйствах, занимающихся производством говядины, используется поглотительное скрещивание производителей (преимущественно чистопородных) высокопродуктивных мясных пород с коровами молочного и комбинированного направления продуктивности [5; 10], что позволяет расширить использование имеющихся ценных генетических ресурсов мясного скота и повысить производство высококачественной говядины. Данный прием хорошо известен в Республике Башкортостан и ранее широко использовался для создания мясных стад. Суть его заключалась в поглощении наследственности малопродуктивной (с точки зрения мясной продуктивности) материнской породы с последующим преобразованием в 4-5 поколении в заводскую отцовскую породу.

На сегодняшний день рациональное использование ценных с точки зрения селекционно-племенной работы генетических ресурсов не возможно без применения молекулярно-генетических методов, которые помогают выявить особенности генофонда породы, разрабатывать генетически обоснованные программы устойчивого развития пород и их сохранения, выявлять ошибки при анализе достоверности происхождения животных [7; 18; 21]. Постоянный мониторинг генетического и продуктивного потенци-

ала животных является необходимым элементом эффективной селекционно-племенной работы. При этом наряду с использованием традиционной оценки племенной ценности животных широко применяется генотипирование по ряду конкретных генетических маркеров [1; 3; 8; 19].

Популярными генетическими маркерами вследствие высокого уровня полиморфизма и стабильного аутосомного кододоминантного наследования являются микросателлиты [6; 9; 11; 15]. Генетический анализ с применением STR-маркеров позволяет селекционерам эффективно использовать различные подходы для управления селекционным процессом [8; 17; 19; 20]. Типирование на основе микросателитов дает возможность специалистам на молекулярном уровне оценить генетическое разнообразие пород и популяций, а также получить информацию для повышения эффективности геномной селекции [4; 12; 13; 14]. В целом, современные ДНК-технологии, используемые в ходе постоянного генетического мониторинга пород, как на индивидуальном, так и на популяционном уровнях, позволяют сократить сроки генетического совершенствования стад.

Благодаря разведению герефордской, лимузинской, абердин-ангусской и казахской белоголовой пород в Республике Башкортостан накоплен определенный генофонд мясного скота. В связи с этим целью исследования явилось изучение полиморфизма микросателитных локусов у мясного скота лимузинской породы, разводимого на территории Республики Башкортостан.

В задачи входило изучение полиморфизма микросателитных локусов у скота лимузинской породы, полученного путем поглотительного скрещивания быков лимузинской породы с коровами комбинированного направления продуктивности (симментальская и бестужевская); изучение генетической структуры и показателей генетического разнообразия субпопуляций лимузинского скота.

Материалы и методы

Исследования проводились в 2024 г. в научно-исследовательской лаборатории «Центр молекулярных и биотехнологических исследований» Башкирского государственного педагогического университета имени М. Акмуллы, на базе Учебно-научного центра коллективного пользования «Лаборатория геномного анализа животных» Российского государственного аграрного университета – Московской сельскохозяйственной академии имени К.А. Тимирязева и в молекулярно-генетической лаборатории Башкирского научно-исследовательского института сельского хозяйства Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук.

Материалом для исследования служила кровь бычков и телок. Отбор образцов осуществлялся из яремной вены в пробирки с ЭДТА. Условия содержания животных в подопытных группах были одинаковыми. Обслуживание животных и экспериментальные исследования были выполнены в соответствии с инструкциями Russian Regulations, 1987 (Order No. 755 on 12.08.1977 the USSR Ministry of Health) and «The Guide for Care and Use of Laboratory Animals (National Academy Press Washington, D.C. 1966)». При выполнении исследований были приняты усилия, чтобы свести к минимуму страдания животных. Объектом исследований явились бычки и телки лимузинской породы в возрасте 13-14 мес. из стад, созданных путем поглотительного скрещивания в хозяйствах СПК «Ярославский» Дуванского района РБ и ООО «Сава-Агро-Япрык» Туймазинского района РБ в период с 2000 по 2005 годы.

I-я опытная группа была сформирована молодняком (n=40) из стада ООО «Мясной союз башкирских производителей», расположенного в с. Кривле-Илюшкино Куюргазинского района РБ, родители изучаемых животных были завезены в хозяйство в 2020 г. из ООО «Сава-Агро-Япрык», где стадо было получено путем поглотительного скрещивания быков лимузинской породы (Мавр3058, Малыш 126, Гекон 3134, Гранит 1010, Важный 147) и коров симментальской породы. II-я группа была сформирована молодняком (n=17) из стада СПК «Ярославский» Дуванского района РБ, стадо было получено путем поглотительного скрещивания быков лимузинской породы (Эпи 125, Е 7120, Ротари 0496, Модисон 8845, № 8643) и коров бестужевской породы.

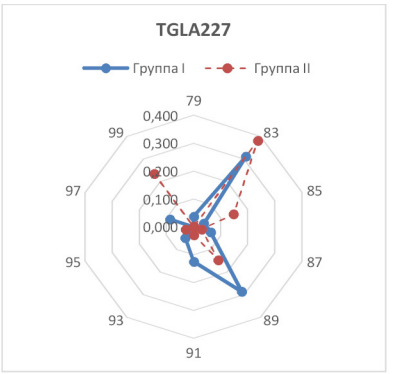
Выделение ДНК проводили с помощью набора ДНК-Экстран 1, для мультиплексного анализа по 16-ти микросателлитным локусам использовали набор Gene Profile Cattle (Научно-производственная компания «СИНТОЛ», Россия). Набор маркеров для анализа включал 16 микросателитов: TGLA227, BM2113, TGLA53, ETH10, CSRM60, SPS115, TGLA122, BM1818, HAUT27, CSSM66, BM1824, ETH3, TGLA126, ETH225, INRA023 и ILSTS006. Фрагменты амплификации идентифицировали на генетическом анализаторе SUPERBIO INTERNATIONAL Honor 1616 (Китай). Идентификацию результатов осуществляли в программе GeneMapper v4.0 (Applied Biosystems) с использованием профиля контрольной ДНК из набора Gene Profile Cattele CD-240. Статистическую обработку данных проводили по стандартным методикам с использованием программного обеспечения GenAlEx v 6.5 (Peakall и Smouse 2006, 2012).

Генетико-популяционный анализ осуществляли по показателям: N_a – количество информативных аллелей, N_e – количество эффективных

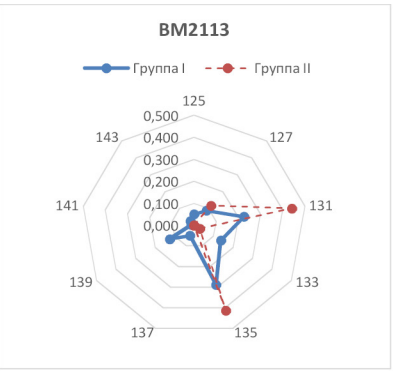
аллелей, I – индекс Шеннона, H_o - наблюдаемая гетерозиготность, H_e - ожидаемая гетерозиготность, F - индекс фиксации Райта. Кластеризацию субпопуляций (стад) крупного рогатого скота проводили с построением диаграммы распределения генотипов животных по микросателитным локусам в системе принципиальных координат (PCoA).

Результаты

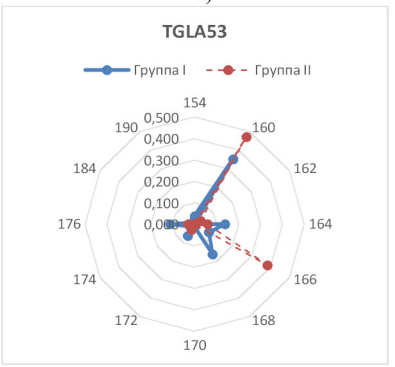
Для мониторинга генетического состояния популяции животных наиболее удобным и общепринятым является анализ STR-маркеров. Оценка генетической структуры изучаемых стад лимузинского скота, созданных путем поглотительного скрещивания, осуществлялась по шестнадцати известным микросателитным локусам. На рисунке 1 (а, б, в, г, д, е, ж, з, и, к, л, м, н, п, р, с) представлены частоты аллелей изученных локусов.



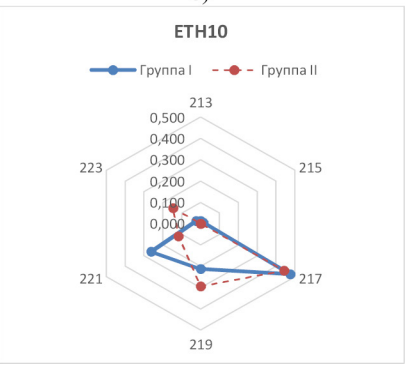
а)



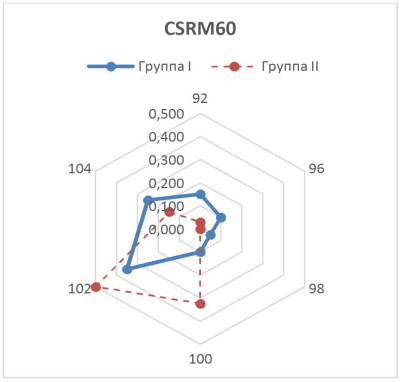
б)



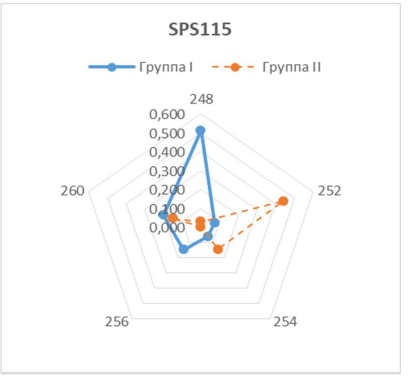
в)



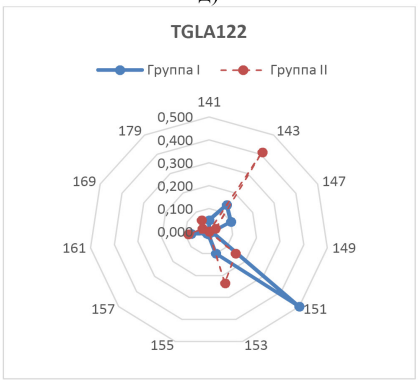
г)


CSRM60
Группа I
Группа II
92
96
98
100
102
104
0,500
0,400
0,300
0,200
0,100
0,000

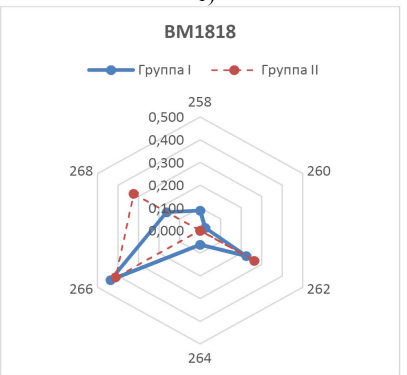
д)


SPS115
Группа I
Группа II
248
252
254
256
260
0,600
0,500
0,400
0,300
0,200
0,100
0,000

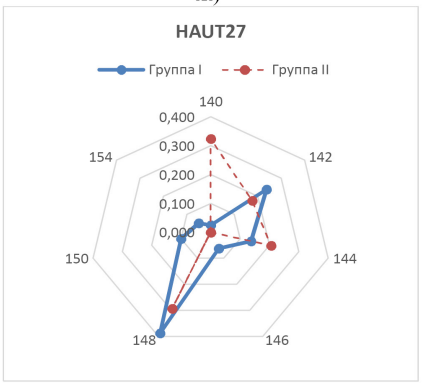
е)


TGLA122
Группа I
Группа II
141
143
147
149
151
153
155
157
161
169
179
0,500
0,400
0,300
0,200
0,100
0,000

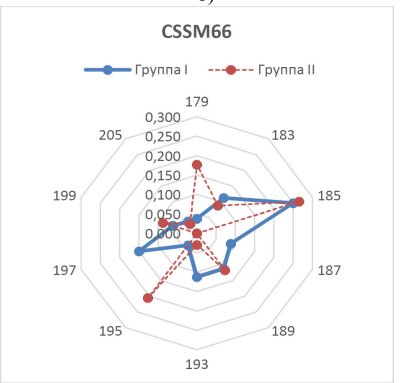
ж)


BM1818
Группа I
Группа II
258
260
262
264
266
268
0,500
0,400
0,300
0,200
0,100
0,000

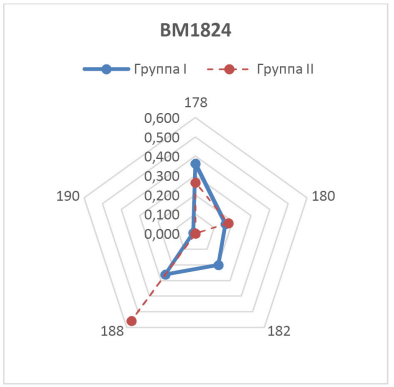
з)


HAUT27
Группа I
Группа II
140
142
144
146
148
150
154
0,400
0,300
0,200
0,100
0,000

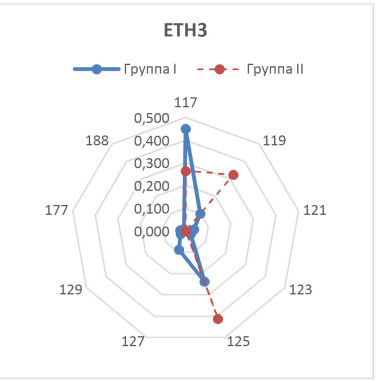
и)


CSSM66
Группа I
Группа II
179
183
185
187
189
193
195
197
199
205
0,300
0,250
0,200
0,150
0,100
0,050
0,000

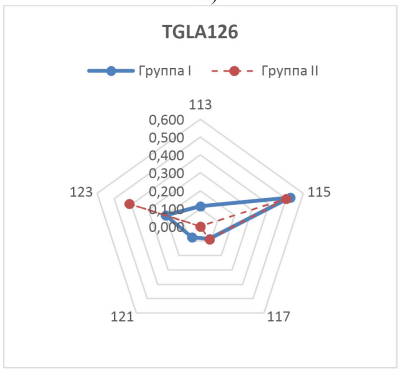
к)



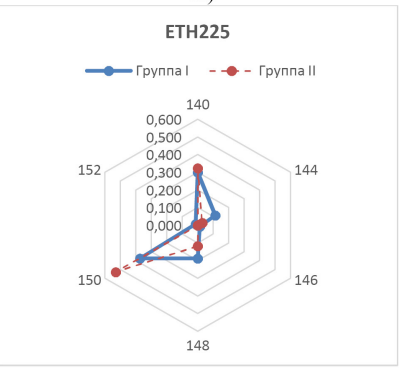
л)



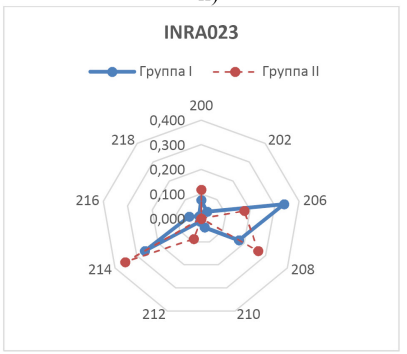
м)



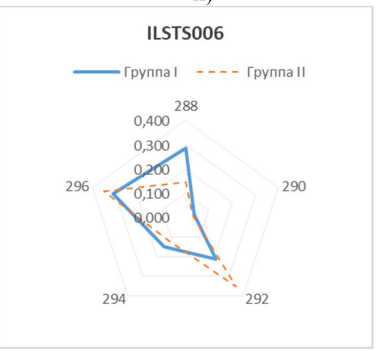
н)



п)



р)



с)

Рис. 1. Частоты аллелей микросателитных локусов

Распределение генотипов животных по микросателитным локусам, их аллельное состояние и частоты аллелей характеризуют особенности генетической структуры субпопуляций крупного рогатого скота, полученных путем поглотительного скрещивания с использованием различных материнских пород.

В целом в изучаемых микросателитных локусах нами отмечено множественный аллелизм, что согласуется с данными других исследований [5; 6; 9-14].

В генетической структуре I группы животных наблюдается 116 аллелей, во II - 74 аллеля, что может свидетельствовать об определенном генетическом разнообразии.

Локус TGLA227. В I группе доля гомозиготных особей по локусу TGLA227 составила 22,50%, при этом наиболее часто встречаются генотипы – 89/89 (7,50%) и 83/83(7,50%). Доля гетерозиготных животных составила 77,50%, наиболее часто встречающиеся генотипы – 83/89 (15,00%) и 89/77 (10,00%). Во II группе животных доля гомозиготных особей составила 11,80%, встречаются только два генотипа 83/83 (5,90%) и 85/85 (5,90%). Доля гетерозиготных животных составила 88,20%, наиболее часто встречается генотип 83/99 (29,40%). У животных I группы определено 8 аллелей, высокая частота наблюдается (рис.1 а) у аллелей 83 (0,313) и 89 (0,288), у II группы определено 7 аллелей, высокая частота – 83 (0,382) и 99 (0,235). В I группе отсутствуют аллели 95 и 99, во II группе редко встречаются аллели 87, 91 и 95 (0,029) и отсутствуют аллели 79, 93, 97.

Локус BM2113. Доля гомозиготных особей по локусу BM2113 в I группе составила 17,50%, при этом наиболее часто встречается генотип 135/135 (15,00%). Доля гетерозиготных животных составила 82,50%, наиболее часто встречающиеся генотипы –127/131 (15,00%). Во II группе животных доля гомозиготных особей составила 41,18%, часто встречается генотип 131/131 (23,53%), доля гетерозиготных животных составила 58,82%, наиболее часто встречается генотип 131/135 (29,41%). У животных I группы определено 9 аллелей, высокая частота встречаемости наблюдается (рис.1 б) у аллелей 131 (0,225) и 135 (0,288), у II группы отмечено 4 аллеля, высокая частота – 131(0,441) и 135 (0,412). В I группе редко встречается аллель 141 (0,013), во II группе редко встречается аллель 133 (0,029) и отсутствуют аллели 125, 137, 139, 141 и 143, которые определяются у животных I группы.

Локус TGLA53. Доля гомозиготных животных по локусу TGLA53 в I группе составила 27,50%, при этом наиболее часто встречается генотип 160/160 (15,00%), доля гетерозиготных животных составила 72,50%,

наиболее часто встречающиеся генотипы –160/168 (10,00%) и 160/176 (12,50%). Во II группе доля гомозиготных особей составила 35,30%, часто встречается генотип 160/160 (23,50%), доля гетерозиготных животных составила 64,70%, наиболее часто встречается генотип 160/166 (29,40%). Высокая частота встречаемости аллелей в этом локусе наблюдается (рис.1 в) у животных I группы - 160 (0,350) (всего определено 11 аллелей), у II группы – 160 (0,471) и 166 (0,382) (определено 6 аллелей). В I группе редко встречаются аллели 170, 184 и 190 (0,013), во II группе отсутствуют аллели 154, 168, 170, 174, 184 и 190, которые с различной частотой встречаются у животных I группы.

Локус ETH10. Доля гомозиготных животных по локусу ETH10 в I группе составила 20,0%, при этом наиболее часто встречается генотип 217/217(17,50%), доля гетерозиготных животных составила 80,0%, наиболее часто встречающиеся генотипы –217/219 (25,00%) и 217/221 (27,50%). Во II группе животных доля гомозиготных особей составила 11,76%, часто встречается генотип 160/160 (23,50%), доля гетерозиготных животных составила 64,70%, встречается только два генотипа 217/217 и 219/219 с одинаковой частотой 5,88. В этом локусе (рис.1 г) у животных I и II групп выявлено 6 и 4 аллеля, отмечена высокая частота аллеля 217 - 0,475 и 0,441 соответственно. В I группе редко встречаются аллели 213 и 215 (0,013), во II группе указанные аллели отсутствуют.

Локус CSRM60. Доля гомозиготных особей по локусу CSRM60 в I и II группах составила 12,50% и 23,59%, при этом наиболее часто встречается генотип 102/102 7,50% и 17,65% соответственно. Доля гетерозиготных животных в I и II группах составила 87,50 и 76,41%, наиболее часто встречающиеся генотипы: 92/102 – 20,00% (в I группе) и 100/102 – 15,00% (во II группе). Высокая частота аллелей в этом локусе наблюдается (рис.1 д) у животных I группы – 102 (0,350) и 104 (0,250) (всего определено 6 аллелей), у II группы – 100 (0,324) и 102 (0,500) (определено 4 аллеля). Во II группе редко встречается аллель 90 (0,029) и отсутствуют аллели 96 и 98, которые с невысокой частотой встречаются у животных I группы.

Локус SPS115. Доля гомозиготных животных по локусу SPS115 в I и II группах составила 37,50% и 17,65%, при этом наиболее часто встречается генотип – 248/248 (32,50% и 17,65%), доля гетерозиготных животных в этих группах составила 62,50% и 82,35%, наиболее часто в обеих группах встречается генотип 248/260 - 12,50% и 29,41% соответственно. В этом локусе (рис.1 е) у животных I и II групп определено соответственно 5 и 4 аллеля, наблюдается высокая частота встречаемости аллеля 248 (по

группам - 0,350 и 0,441) и аллеля 260 (0,200 и 0,265). Во II группе отсутствует аллель 254.

Локус TGLA122. Доля гомозиготных особей по локусу TGLA122 в I и II группах составила 27,50% и 5,88%, среди животных I группы наиболее часто встречается генотип 151/151 (22,50%), во II группе отмечено только одно животное гомозиготным генотипом 151/151. Доля гетерозиготных животных в I и II группах составила 72,50% и 94,12%, наиболее часто встречающиеся генотипы: 143/151 (17,50% в I группе) и 143/153 (41,17% во II группе). У животных I группы определено 9 аллелей, высокая частота встречаемости (рис.1 ж) наблюдается у аллелей 151 (0,500), у II группы определено 7 аллелей, высокая частота у аллелей 143(0,412) и 153 (0,253). В I группе редко встречаются аллели 149, 155, 157 (0,013), отсутствуют аллели 169 и 179. Во II группе редко встречаются аллели 147 и 169 (0,029) и отсутствуют аллели 141, 155, 157, которые с невысокой частотой встречаются у животных I группы.

Локус BM1818. Доля гомозиготных особей по локусу BM1818 в I группе составила 27,50%, при этом наиболее часто встречается генотип 266/266 (22,5%), доля гетерозиготных животных составила 72,50%, наиболее часто встречающийся генотип 262/266 (22,50%). Во II группе животных доля гомозиготных особей составила 11,76%, встречаются только два генотипа – 266/266 и 268/268 (5,88%). Доля гетерозиготных животных составила 88,24%, часто встречаются генотипы 262/266 и 266/268 с одинаковой частотой 35,29%. В этом локусе (рис.1з) у животных I и II групп определено 6 и 3 аллеля, отмечена высокая частота у аллеля 266 - 0,438 и 0,412 соответственно, среди животных II группы высокая частота у аллеля 268 (0,324). В I группе редко встречается аллель 260 (0,025), во II группе аллели 258, 260 отсутствуют.

Локус HAUT27. В I группе доля гомозиготных особей по локусу HAUT27 составила 40,00%, при этом наиболее часто встречаются генотипы 148/148 и 142/142 с одинаковой частотой 15,00%. Доля гетерозиготных животных составила 60,00%, наиболее часто встречающиеся генотипы 148/150 (12,50%) и 144/148 (10,00%). Во II группе животных доля гомозиготных особей составила 35,29%, часто встречается генотип 148/148 (17,64%), доля гетерозиготных животных составила 64,71%, наиболее часто встречается генотип 140/144 (17,65%). В этом локусе (рис.1 и) у животных I группы выявлено 7 аллелей, отмечена высокая частота аллеля 148 (0,388), у II группы - 4 аллеля, часто встречаются аллели 140 (0,324) и 148 (0,294). Во II группе аллели 146 и 150 отсутствуют.

Локус CSSM66. Доля гомозиготных животных по локусу CSSM66 в I группе составила 10,00%, при этом наиболее часто встречается генотип 185/185 (5,00%). Доля гетерозиготных животных составила 90,00%, наиболее часто встречается генотип 185/189 (15,00%). Во II группе все животные имеют гетерозиготные генотипы, наиболее часто встречается генотип 199/178 (29,41%). У животных I и II групп определено 10 и 8 аллелей, высокая частота (рис.1 к) наблюдается у аллеля 185 - 0,250 и 0,265 соответственно. Во II группе с одинаковой частотой редко встречаются аллели 193 и 205 (0,029), отсутствуют аллели 187 и 197.

Локус BM1824. В I группе доля гомозиготных особей по локусу BM1824 составила 27,50%, при этом наиболее часто встречается генотип 178/178 (12,50%). Доля гетерозиготных животных составила 72,50%, наиболее часто встречается генотип 178/182 (20,00%). Во II группе, доля гомозиготных животных составила 5,88%, определено одно гомозиготное животное с генотипом 188/188. Доля гетерозиготных животных составила 94,12%, наиболее часто встречается генотип 178/188 (52,94%). В этом локусе (рис.1 л) у животных I группы определено 5 аллелей, отмечена высокая частота аллеля 178 (0,363), у II группы определено 3 аллеля, часто встречается аллель 188 (0,559). Во II группе отсутствует аллели 182 и 190.

Локус ETH3. Доля гомозиготных особей по локусу ETH3 в I группе составила 20,00%, все они имеют генотип 117/117, доля гетерозиготных животных составила 80,00%, наиболее часто встречающийся генотип – 117/125 (22,50%). Во II группе животных доля гомозиготных особей составила 41,18%, часто встречается генотип 125/125 (23,53%). Доля гетерозиготных животных составила 58,82%, часто встречается генотип 117/115 (23,53%). В этом локусе (рис.1 м) у животных I группы определено 9 аллелей, отмечена высокая частота аллеля 117 - 0,450, среди особей II группы – 3 аллеля и высокая частота у аллелей 125 (0,412) и 119 (0,324). В I группе редко встречаются аллели 188 (0,013) и 123, 129, 177 (0,025), во II группе отсутствуют аллели 121, 123, 127, 129, 177 и 188, которые определены в I группе животных.

Локус TGLA126. Доля гомозиготных особей по локусу TGLA126 в I группе составила 42,50%, при этом часто встречается генотип 115/115 (37,50%). Доля гетерозиготных животных составила 57,50%, наиболее часто встречающийся генотип 115/123 (27,50%). Во II группе доля гомозиготных особей составила 17,65%, все они имеют генотип 115/115. Доля гетерозиготных животных составила 82,35%, часто встречается генотип 115/123 (35,29%). В этом локусе (рис.1 н) у животных I и II групп выявлено

5 и 3 аллеля, отмечена высокая частота аллеля 115 - 0,525 и 0,500 соответственно. Во II группе отсутствуют аллели 113 и 121.

Локус ETH225. В I группе доля гомозиготных особей по локусу ETH225 составила 35,00%, при этом наиболее часто встречается генотип 150/150 (17,50%). Доля гетерозиготных животных составила 65,00%, наиболее часто встречающиеся генотипы 140/150 (15,00%). Во II группе, доля гомозиготных животных составила 47,06%, часто встречаются особи с генотипом 150/150 (29,41%). Доля гетерозиготных животных составила 52,94%, наиболее часто встречается генотип 140/150 (47,06%). В этом локусе (рис.1 п) у животных I группы определено 6 аллелей, отмечена высокая частота аллелей 150 (0,375) и 140 (0,300), у II группы определено 4 аллеля, часто встречаются аллели 140 (0,324) и 150 (0,529). Во II группе отсутствует аллели 182 и 190.

Локус INRA023. Доля гомозиготных особей по локусу INRA02***3*** в I и II группах составила 17,50% и 29,41%, среди животных I группы наиболее часто встречается генотип 206/206 (7,50%), во II группе - 208/208 (11,77). Доля гетерозиготных животных в I и II группах составила 82,50% и 70,59%, наиболее часто встречающиеся генотипы: 206/214 (20,00%) в I группе и 206/214 (17,67%) и 212/214 (17,67%) во II группе. У животных I группы определено 9 аллелей, высокая частота встречаемости (рис.1 р) наблюдается у аллелей 206 (0,338) и 214 (0,263), у II группы определено 5 аллелей, высокая частота у аллелей 208 (0,265) и 214 (0,353). В I группе редко встречаются аллели 210 и 218 (0,013). Во II группе отсутствуют аллели 202, 210, 216, 218, которые с невысокой частотой встречаются у животных I группы.

Локус ILSTS006. В I группе доля гомозиготных особей по локусу ILSTS006 составила 15,00%, при этом наиболее часто встречается генотип 296/296 (7,50%). Доля гетерозиготных животных составила 85,00%, наиболее часто встречается генотип 288/296 (30,00%). Во II группе, доля гомозиготных животных составила 23,53%, часто встречается генотип 296/296 (17,65%). Доля гетерозиготных животных составила 76,47%, часто встречается генотип 292/294 (23,53%). У животных I группы (рис.1 с) определено 5 аллелей, отмечена высокая частота аллелей 288 (0,288) и 296 (0,313), у II группы также определено 5 аллелей, часто встречаются аллели 292(0,353) и 296 (0,353). Во II группе редко встречается аллель 290, частота которого составила 0,029.

В целом, анализируя показатели распределения частот аллелей в STR локусах по исследуемым популяциям, следует отметить, что в 16-ти локу-

сах есть аллели, которые и в I и во II группе в одних и тех же локусах показывают высокую частоту встречаемости. Так, в обеих группах отмечена высокая частота встречаемости TGLA227 38 (0,313 и 0,382), ETH10 217 (0,475 и 0,441), SPS115 248 (0,513 и 0,441), BM1818 266 (0,438 и 0,412), ILSTS006 296 (0,313 и 0,353), TGLA126 115 (0,525 и 0,500), CSSM66 185 (0,250 и 0,265), TGLA53 160 (0,350 и 0,471), CSRM60 102 (0,350 и 0,500), ETH225 150 (0,375 и 0,529) соответственно.

В пяти локусах в обеих группах животных наблюдаются высокая частота встречаемости разных аллелей. Так в I группе животных отмечена высокая частота встречаемости аллелей BM2113 135 (0,288), TGLA122 151 (0,500), HAUT27 148 (0,388), ETH3 117 (0,450), INRA023 206 (0,338), во II группе животных - высокая частота встречаемости аллелей BM2113 131 (0,441), TGLA122 143 (0,412), HAUT27 140 (0,324), BM1824 188 (0,559), ETH3 125 (0,412), INRA023 214 (0,353).

В таблице 1 приводятся показатели аллельного состояния микросателитных локусов и индекс Шеннона, характеризующий генетическое разнообразие изучаемых субпопуляций.

Таблица 1.

Показатели аллельного состояния микросателитных локусов лимузинского скота и генетического разнообразия изучаемых стад

Локус	Показатели					
	Na		Ne		I	
	I	II	I	II	I	II
TGLA227	8	7	4,699	4,042	1,764	1,583
BM2113	9	4	5,517	2,639	1,886	1,082
TGLA53	11	6	5,195	2,676	1,929	1,200
ETH10	6	4	2,936	3,158	1,236	1,255
CSRM60	6	4	4,348	2,651	1,609	1,097
SPS115	5	4	2,988	3,247	1,317	1,277
TGLA122	9	7	3,361	3,853	1,588	1,576
BM1818	6	3	3,563	2,905	1,471	1,082
HAUT27	7	4	4,124	3,778	1,627	1,357
CSSM66	10	8	7,207	5,723	2,124	1,871
BM1824	5	3	3,747	2,418	1,391	0,983
ETH3	9	3	3,571	2,905	1,599	1,082
TGLA126	5	3	2,928	2,340	1,313	0,926
ETH225	6	4	3,587	2,502	1,398	1,057

Локус	Показатели					
	Na		Ne		I	
	I	II	I	II	I	II
INRA023	9	5	4,451	4,042	1,723	1,491
ILSTS006	5	5	4,010	3,503	1,459	1,373
В среднем по группе	7,250 ±0,504[а] ***	4,625 ±0,397[б]	4,140 ±0,280 [а] **	3,274 ±0,218 [б]	1,590 ±0,062	1,429 ±0,053
В среднем по популяции	5,938±0,394		3,707±0,191		1,429±0,053	

Примечание: Na – аллели; Ne – эффективные аллели, I – индекс Шеннона
Здесь и далее: ***p < 0,001; **p < 0,01; а и б – сравниваемые показатели.

Анализируя полученные результаты, следует отметить, что в I группе среднее количество аллелей на локус с высокой степенью достоверности (p < 0,001) превышает аналогичный показатель во II группе на 2,625, количество эффективных аллелей (p < 0,01) на 0,866 и наблюдается тенденция увеличения индекса Шеннона – на 0,161, что в определенной степени является свидетельством более высокого генетического разнообразия субпопуляции созданной поглотительным скрещиванием на основе симментальской породы. Число аллелей на локус в I группе варьирует от 5 до 11, во II группе – от 3 до 8.

В среднем по популяции количество аллелей составило 5,938, эффективных аллелей – 3,707, индекс Шеннона – 1,429. Полученные данные согласуются с результатами исследований ряда авторов на черно-пестрой породе, сычевской, бурой швицкой и ярославской породах, где среднее количество аллелей на локус составило 7, в то время как в герефордской и симментальской этот показатель снижен до 3,3 и 5,3 аллелей на локус соответственно [5].

Наибольшее количество аллелей отмечено в обеих группах животных в локусе CSSM66 (10 и 8), только в I группе - в локусах TGLA53 (11) и TGLA122 (9). Наименьшее количество аллелей в обеих группах животных наблюдается в локусах BM1824 - (5;3) и TGLA126 - (5;3), только у II группы - в локусах ETH3 (3) и BM1818 (3). Наибольшее количество эффективных аллелей в обеих группах отмечено в локусе CSSM66 (7,207 и 5,723).

Генетическое разнообразие в популяциях характеризует показатель - индекс Шеннона. Во второй группе значения индекса не превышали 1,583 (TGLA227). Высокие показатели данного индекса наблюдались у бычков

I группы в локусах TGLA227 (1,764), BM2113 (1,886), TGLA53(1,929), CSSM66 (2,124), INRA023 (1,723), что свидетельствует о высоком вкладе аллельного состояния данных локусов в генетическое разнообразие субпопуляции крупного рогатого скота лимузинской породы, разводимого в Куюргазинском районе Республике Башкортостан.

Данные расчетов наблюдаемой и ожидаемой гетерозиготности приводятся в таблице 2.

Таблица 2.

Наблюдаемая и ожидаемая гетерозиготность

Группа	He	Ho	F
I	0,744±0,015[а**]	0,742±0,025	0,003±0,028
II	0,677±0,018[б]	0,768±0,035	-0,138±0,050
В среднем	0,711±0,013	0,755±0,021	-0,068±0,031

Примечание: Ho - наблюдаемая гетерозиготность, He - ожидаемая гетерозиготность, F - индекс Райта

Анализ показателей ожидаемой гетерозиготности изученных стад выявил достоверные межгрупповые различия ($p < 0,01$), так в I группе данный показатель был выше на 0,067. В разрезе изучаемых групп отмечена незначительная разница между полученными данными наблюдаемой и ожидаемой гетерозиготности, что подтверждается низкими значениями индекса фиксации Райта. В данном случае значения индекса в изучаемых стадах варьировала от - 0,136 до 0,003 и близки к нулю, что свидетельствует о незначительном различии в частотах аллелей изучаемых стад и о низкой дивергенции.

Кластеризация субпопуляций молодняка в PCoA приводится на рисунке 2, где на основе генотипов по микросателитным локусам представлено пространственное распределение каждого исследованного животного.

Анализируя графическое изображение можно сказать, что две изучаемые субпопуляции представляют собой хорошо консолидированные группы, имеющие общую зону распределения генотипов по микросателитным локусам в центре массива. Также отмечено, что определенная часть генотипов расположена за пределами центра массива, особенно это характерно для особей, где материнской основой при создании стада являлась симментальская порода. Пространственное расположение генотипов в системе принципиальных координат свидетельствует о сохранении индивидуального генетического разнообразия особей, которые объединены общностью происхождения и принадлежностью к одной породе.

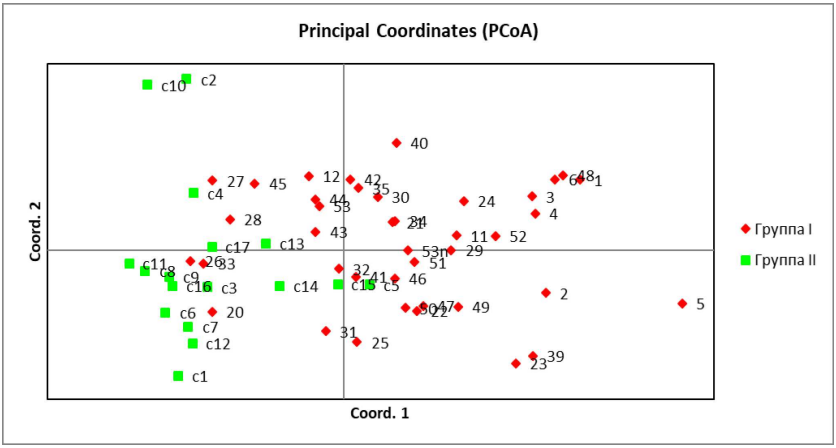


Рис. 2. Кластеризация субпопуляций молодняка лимузинского скота

Заключение

При анализе 16 STR локусов ДНК крупного рогатого скота лимузинской породы идентифицировано 116 аллелей у I группы животных из стада, где при поглотительном скрещивании материнской основой служила симментальская порода и 77 аллеля - у II группы животных, где материнской основой была бестужевская порода. Число аллелей на один локус у I группы в среднем составило 7,25 у II группы – 4,63. У животных I и II группы среднее количество эффективных аллелей по локусам составило 4,14 и 3,27 соответственно. В I группе среднее количество аллелей на локус с высокой степенью достоверности на 2,625 ($p < 0,001$) превышает аналогичный показатель во II группе, что в определенной степени является свидетельством более высокого генетического разнообразия, здесь же количество эффективных аллелей выше на 0,866 ($p < 0,01$). В I группе также наблюдаются высокие значения индекса Шенона в локусах TGLA227, BM2113, TGLA53, CSSM66, INRA023. Число аллелей на локус в I группе варьирует от 5 до 11, во II группе – от 3 до 8. В среднем по популяции количество аллелей составило 5,938, эффективных аллелей – 3,707, индекс Шеннона – 1,429. Показатели наблюдаемой и ожидаемой гетерозиготности различаются не значительно. Пространственное расположение генотипов в системе принципиальных координат свидетельствует о том, что изучаемые субпопуляции представляют собой хорошо консолидированные группы, наблюдается сохранение индивидуального генетического

разнообразия особей, которые объединены общностью происхождения и принадлежностью к одной породе.

Список литературы

1. Джуламанов, К. М., Селионова, М. И., & Герасимов, Н. П. (2018). Генетическая характеристика популяции герефордского скота. *Вестник Башкирского государственного аграрного университета*, (4(48)), 59–64. https://doi.org/10.31563/1684-7628-2018-48-4-59-64. EDN: https://elibrary.ru/YVBCJN
2. Дунин, И. М., Тяпугин, С. Е., Мещеров, Р. К., Ходыков, В. П., Аджибеков, В. К., Тяпугин, Е. Е., & Дюльдина, А. В. (2020). Состояние мясного скотоводства в Российской Федерации: реалии и перспективы. *Молочное и мясное скотоводство*, (2), 2–7. https://doi.org/10.33943/MMS.2020.40.30.001. EDN: https://elibrary.ru/TPIWMS
3. Калашникова, Л. А., Тяпугин, С. Е., Новиков, А. А., & Григорян, Л. Н. (2022). Состояние генофонда в племенном животноводстве Российской Федерации. *Зоотехния*, (12), 13–16. https://doi.org/10.25708/ZT.2022.12.85.004. EDN: https://elibrary.ru/IMAXVW
4. Каюмов, Ф. Г., & Третьякова, Р. Ф. (2023). Микросателлитный анализ ДНК крупного рогатого скота калмыцкой породы, выращенного в Республике Калмыкия. *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*, (4(102)), 261–265. https://doi.org/10.37670/2073-0853-2023-102-4-261-265. EDN: https://elibrary.ru/YROYCV
5. Косилов, В. И., Толочка, В. В., Калякина, Р. Г., Быкова, О. А., Гизатуллин, Р. С., & Ермолова, Е. М. (2021). Влияние скрещивания скота разного направления продуктивности на качество мясной продукции помесей. *Аграрный вестник Приморья*, (2(22)), 34–38. EDN: https://elibrary.ru/STQKNC
6. Лубенникова, М. В., Афанасьев, В. А., & Афанасьев, К. А. (2024). Полиморфизм микросателлитных маркеров в шебалинской популяции маралов. *Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии*, (1(65)), 163–169. https://doi.org/10.18286/1816-4501-2024-1-163-169. EDN: https://elibrary.ru/UPQOEE
7. Насамбаев, Е. Г., Бейшова, И. С., Ульянова, Т. В., & Черняева, С. А. (2023). Изучение генетической структуры крупного рогатого скота герефордской породы с применением микросателлитных маркеров. *Наука и образование*, (2-1(71)), 74–82. https://doi.org/10.52578/2305-9397-2023-2-1-74-82. EDN: https://elibrary.ru/GGXULB
8. Николаев, С. В., & Ялуга, В. Л. (2024). Генетическая характеристика быков-производителей холмогорской породы в зависимости от их линейной

принадлежности и уровня голштинизации. *Аграрная наука*, (6), 77–81. https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-383-6-77-81. EDN: https://elibrary.ru/LHZIEY

9. Николаев, С. В., & Ялуга, В. Л. (2023). Сравнительная генетическая характеристика микросателлитного профиля голштинизированных и чистопородных холмогорских быков. *Аграрная наука*, (7), 58–62. https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-372-7-58-62. EDN: https://elibrary.ru/MMSGBJ
10. Самоделкин, А. Г., Басонов, О. А., Асадчий, А. А., & Козаков, А. В. (2018). Продуктивность помесей различных генотипов при поглотительном скрещивании коров чёрно-пёстрой породы с герефордскими быками. *Вестник Нижегородской государственной сельскохозяйственной академии*, (4(20)), 38–42. EDN: https://elibrary.ru/YXKHXN
11. Седых, Т. А., Гладырь, Е. А., Долматова, И. Ю., Волкова, В. В., Гизатуллин, Р. С., & Зиновьева, Н. А. (2014). Полиморфизм микросателлитных локусов крупного рогатого скота герефордской породы различных эколого-генетических генераций. *Вестник АПК Ставрополья*, (3(15)), 121–128. EDN: https://elibrary.ru/SZBVNB
12. Столповский, Ю. А., Бекетов, С. В., Солоднева, Е. В., & Кузнецов, С. Б. (2024). Сохранение генетических ресурсов сельскохозяйственных животных. *Главный зоотехник*, (3(248)), 3–18. https://doi.org/10.33920/sel-03-2403-01. EDN: https://elibrary.ru/CWYNQN
13. Тяпугин, С. Е., Калашникова, Л. А., Новиков, А. А., & Семак, М. С. (2022). Генетическая экспертиза племенной продукции в животноводстве по группам крови и маркерам ДНК. *Зоотехния*, (5), 2–5. https://doi.org/10.25708/ZT.2022.20.69.001. EDN: https://elibrary.ru/MNGTYS
14. Харзинова, В. Р., Кудрявцев, А. В., Семерикова, М. Н., & Зиновьева, Н. А. (2023). Изучение популяционной структуры и генетического разнообразия чукотской породы северного оленя на основе анализа микросателлитов. *Достижения науки и техники АПК*, (9(37)), 87–92. https://doi.org/10.53859/02352451_2023_37_9_87. EDN: https://elibrary.ru/VBESRE
15. Часовщикова, М. А., & Шевелева, О. М. (2018). Генетическая характеристика крупного рогатого скота герефордской породы Тюменской области с использованием микросателлитных ДНК-маркеров. *Вестник ИрГСХА*, (88), 141–150. EDN: https://elibrary.ru/VKFEGI
16. Шамина, О. В. (2023). Роль мясного скотоводства в формировании мясного баланса России. *Russian Journal of Management*, (2(11)), 184–190. https://doi.org/10.29039/2409-6024-2023-11-2-184-190. EDN: https://elibrary.ru/YGHQNW

17. Шаталина, О. С., Ткаченко, И. В., & Ярышкин, А. А. (2021). Генетическая структура популяции голштинизированного чёрно-пёстрого скота по микросателлитным локусам. *Генетика*, *57*(2), 205–213. https://doi.org/10.31857/S0016675821020090. EDN: https://elibrary.ru/HUEAQD
18. Bora, Sh., Tessema, T., & Girmay, G. (2023). Genetic diversity and population structure of selected Ethiopian indigenous cattle breeds using microsatellite markers. *Genetics Research*, 2023, 1106755. https://doi.org/10.1155/2023/1106755. EDN: https://elibrary.ru/WRLLJG
19. Petrov, A., & Kamaldinov, E. (2024). Genetic structure of cattle of the Siberian branch by microsatellite loci. *Bulletin of NSAU (Novosibirsk State Agrarian University)*, 72(3), 230–239. https://doi.org/10.31677/2072-6724-2024-72-3-230-239. EDN: https://elibrary.ru/OUEOOC
20. Stevanovic, J., Stanimirovic, Z., Dimitrijevic, V., & Maletic, M. (2010). Evaluation of 11 microsatellite loci for their use in paternity testing in Yugoslav Pied cattle (YU Simmental cattle). *Czech Journal of Animal Science*, *55*, 221–226. https://doi.org/10.17221/183/2009-CJAS
21. Ubushieva, V., Gorlov, I., Chimidova, N., & Ubushieva, A. (2024). Microsatellite analysis of Kalmyk cattle. *RUDN Journal of Agronomy and Animal Industries*, *19*, 12–18. https://doi.org/10.22363/2312-797X-2024-19-1-12-18. EDN: https://elibrary.ru/BIJLFM

References

1. Dzhulamanov, K. M., Selionova, M. I., & Gerasimov, N. P. (2018). Genetic characteristics of the Hereford cattle population. *Bulletin of Bashkir State Agrarian University*, *(4(48))*, 59–64. https://doi.org/10.31563/1684-7628-2018-48-4-59-64. EDN: https://elibrary.ru/YVBCJN
2. Dunin, I. M., Tyapugin, S. E., Meshcherov, R. K., Khodykov, V. P., Adzhibekov, V. K., Tyapugin, E. E., & Dyuldina, A. V. (2020). State of beef cattle breeding in the Russian Federation: realities and prospects. *Milk and Meat Cattle Breeding*, *(2)*, 2–7. https://doi.org/10.33943/MMS.2020.40.30.001. EDN: https://elibrary.ru/TPIWMS
3. Kalashnikova, L. A., Tyapugin, S. E., Novikov, A. A., & Grigoryan, L. N. (2022). State of the gene pool in pedigree livestock breeding in the Russian Federation. *Zootechny*, *(12)*, 13–16. https://doi.org/10.25708/ZT.2022.12.85.004. EDN: https://elibrary.ru/IMAXVW
4. Kayumov, F. G., & Tretyakova, R. F. (2023). Microsatellite DNA analysis of Kalmyk cattle raised in the Republic of Kalmykia. *Proceedings of Orenburg State Agrarian University*, *(4(102))*, 261–265. https://doi.org/10.37670/2073-0853-2023-102-4-261-265. EDN: https://elibrary.ru/YROYCV

5. Kosilov, V. I., Tolochka, V. V., Kalyakina, R. G., Bykova, O. A., Gizatullin, R. S., & Ermolova, E. M. (2021). Effect of crossbreeding cattle of different productivity types on meat quality of crossbreds. *Agrarian Bulletin of Primorye*, *(2(22))*, 34–38. EDN: https://elibrary.ru/STQKNC
6. Lubennikova, M. V., Afanasyev, V. A., & Afanasyev, K. A. (2024). Polymorphism of microsatellite markers in the Shebalino population of marals. *Bulletin of Ulyanovsk State Agricultural Academy*, *(1(65))*, 163–169. https://doi.org/10.18286/1816-4501-2 Newton-1-163-169. EDN: https://elibrary.ru/UPQOEE
7. Nasambaev, E. G., Beishova, I. S., Ulyanova, T. V., & Chernyaeva, S. A. (2023). Study of the genetic structure of Hereford cattle using microsatellite markers. *Science and Education*, *(2-1(71))*, 74–82. https://doi.org/10.52578/2305-9397-2023-2-1-74-82. EDN: https://elibrary.ru/GGXULB
8. Nikolaev, S. V., & Yaluga, V. L. (2024). Genetic characteristics of Holmogor bulls depending on their linear affiliation and level of Holsteinization. *Agrarian Science*, *(6)*, 77–81. https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-383-6-77-81. EDN: https://elibrary.ru/LHZIEY
9. Nikolaev, S. V., & Yaluga, V. L. (2023). Comparative genetic characteristics of microsatellite profile of Holsteinized and purebred Holmogor bulls. *Agrarian Science*, *(7)*, 58–62. https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-372-7-58-62. EDN: https://elibrary.ru/MMSGBJ
10. Samodelkin, A. G., Basonov, O. A., Asadchiy, A. A., & Kozakov, A. V. (2018). Productivity of crossbreds of various genotypes in absorption crossing of Black-and-White cows with Hereford bulls. *Bulletin of Nizhny Novgorod State Agricultural Academy*, *(4(20))*, 38–42. EDN: https://elibrary.ru/YXKHXN
11. Sedykh, T. A., Gladyr, E. A., Dolmatova, I. Yu., Volkova, V. V., Gizatullin, R. S., & Zinovieva, N. A. (2014). Polymorphism of microsatellite loci in Hereford cattle of various ecological-genetic generations. *Bulletin of AIC Stavropol*, *(3(15))*, 121–128. EDN: https://elibrary.ru/SZBVNB
12. Stolpovsky, Yu. A., Beketov, S. V., Solodneva, E. V., & Kuznetsov, S. B. (2024). Preservation of genetic resources of farm animals. *Chief Zootechnician*, *(3(248))*, 3–18. https://doi.org/10.33920/sel-03-2403-01. EDN: https://elibrary.ru/CWYNQN
13. Tyapugin, S. E., Kalashnikova, L. A., Novikov, A. A., & Semak, M. S. (2022). Genetic examination of breeding products in livestock using blood groups and DNA markers. *Zootechny*, *(5)*, 2–5. https://doi.org/10.25708/ZT.2022.20.69.001. EDN: https://elibrary.ru/MNGTYS
14. Kharzinova, V. R., Kudryavtsev, A. V., Semerikova, M. N., & Zinovieva, N. A. (2023). Study of population structure and genetic diversity of Chukotka reindeer breed based on microsatellite analysis. *Achievements of Science and Technolo-*

gy of AIC, *(9(37))*, 87–92. https://doi.org/10.53859/02352451_2023_37_9_87. EDN: https://elibrary.ru/VBESRE

15. Chasovshchikova, M. A., & Sheveleva, O. M. (2018). Genetic characteristics of Hereford cattle in Tyumen Oblast using microsatellite DNA markers. *Bulletin of IrGSXA*, *(88)*, 141–150. EDN: https://elibrary.ru/VKFEGI
16. Shamina, O. V. (2023). The role of beef cattle breeding in forming Russia's meat balance. *Russian Journal of Management*, *2*(11), 184–190. https://doi.org/10.29039/2409-6024-2023-11-2-184-190. EDN: https://elibrary.ru/YGHQNW
17. Shatalina, O. S., Tkachenko, I. V., & Yaryshkin, A. A. (2021). Genetic structure of the Holsteinized Black-and-White cattle population based on microsatellite loci. *Genetics*, *57*(2), 205–213. https://doi.org/10.31857/S0016675821020090. EDN: https://elibrary.ru/HUEAQD
18. Bora, Sh., Tessema, T., & Girmay, G. (2023). Genetic diversity and population structure of selected Ethiopian indigenous cattle breeds using microsatellite markers. *Genetics Research*, 2023, 1106755. https://doi.org/10.1155/2023/1106755. EDN: https://elibrary.ru/WRLLJG
19. Petrov, A., & Kamaldinov, E. (2024). Genetic structure of cattle of the Siberian branch by microsatellite loci. *Bulletin of NSAU (Novosibirsk State Agrarian University)*, 72(3), 230–239. https://doi.org/10.31677/2072-6724-2024-72-3-230-239. EDN: https://elibrary.ru/OUEOOC
20. Stevanovic, J., Stanimirovic, Z., Dimitrijevic, V., & Maletic, M. (2010). Evaluation of 11 microsatellite loci for their use in paternity testing in Yugoslav Pied cattle (YU Simmental cattle). *Czech Journal of Animal Science*, *55*, 221–226. https://doi.org/10.17221/183/2009-CJAS
21. Ubushieva, V., Gorlov, I., Chimidova, N., & Ubushieva, A. (2024). Microsatellite analysis of Kalmyk cattle. *RUDN Journal of Agronomy and Animal Industries*, *19*, 12–18. https://doi.org/10.22363/2312-797X-2024-19-1-12-18. EDN: https://elibrary.ru/BIJLFM

ВКЛАД АВТОРОВ

Седых Т.А.: проведение эксперимента, интерпретация результатов, подготовка текста статьи.

Гареева Д.И.: проведение эксперимента, интерпретация результатов, подготовка текста статьи.

Субханкулов Н.Р.: проведение эксперимента, интерпретация результатов, подготовка текста статьи.

Косилов В.И.: проведение эксперимента, интерпретация результатов, подготовка текста статьи.

Зорин Д.Н.: проведение эксперимента, интерпретация результатов, подготовка текста статьи.

Гладких М.Ю.: проведение эксперимента, интерпретация результатов, подготовка текста статьи.

Селионова М.И.: проведение эксперимента, интерпретация результатов, подготовка текста статьи.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Tatiana A. Sedykh: conducting of the experiment, interpretation of the results, preparation of the text of the paper.

Diana I. Gareeva: conducting of the experiment, interpretation of the results, preparation of the text of the paper.

Niyaz R. Subkhankulov: conducting of the experiment, interpretation of the results, preparation of the text of the paper.

Vladimir I. Kosilov: conducting of the experiment, interpretation of the results, preparation of the text of the paper.

Dmitry N. Zorin: conducting of the experiment, interpretation of the results, preparation of the text of the paper.

Marianna Yu. Gladkikh: conducting of the experiment, interpretation of the results, preparation of the text of the paper.

Marina I. Selionova: conducting of the experiment, interpretation of the results, preparation of the text of the paper.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Седых Татьяна А.

Уфимский федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Башкирский научно-исследовательский институт сельского хозяйства; Башкирский государственный педагогический университет им. М. Акмуллы

просп. Октября, 71, г. Уфа, 450054, Российская Федерация; ул. Октябрьской революции, 3а, г. Уфа, 450008, Российская Федерация

nio_bsau@mail.ru

Гареева Диана И.

Уфимский федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Башкирский научно-исследовательский институт сельского хозяйства; Башкирский государственный педагогический университет им. М. Акмуллы

просп. Октября, 71, г. Уфа, 450054, Российская Федерация; ул. Октябрьской революции, 3а, г. Уфа, 450008, Российская Федерация
diana.razgar@mail.ru

Субханкулов Нияз Р.
Уфимский федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Башкирский научно-исследовательский институт сельского хозяйства
просп. Октября, 71, г. Уфа, 450054, Российская Федерация
niyazsubhankulov@gmail.com

Косилов Владимир И.
Оренбургский государственный аграрный университет
ул. Челюскинцев, 18, г. Оренбург, 480014, Российская Федерация
kosilov_vi@bk.ru

Зорин Дмитрий Н.
Российский государственный аграрный университет – Московская сельскохозяйственная академия им. К.А. Тимирязева
ул. Тимирязевская, 49, г. Москва, 127550, Российская Федерация
ethodmitry@mail.ru

Гладких Марианна И.
Российский государственный аграрный университет – Московская сельскохозяйственная академия им. К.А. Тимирязева
ул. Тимирязевская, 49, г. Москва, 127550, Российская Федерация
marianna.gladkikh@rgau-msha.ru

Селионова Марина И.
Российский государственный аграрный университет – Московская сельскохозяйственная академия им. К.А. Тимирязева
ул. Тимирязевская, 49, г. Москва, 127550, Российская Федерация
selionova@rgau-msha.ru

DATA ABOUT THE AUTHORS

Tatiana A. Sedykh
Ufa Branch of the Russian Academy of Sciences, Bashkir State Agrarian Institute; Bashkir State Pedagogical Institute named after M. Akmulla

71, Oktyabrya Ave., Ufa, 450054, Russian Federation; 3a, Oktiabrskoi revolutsii Str., Ufa, 450008, Russian Federation
nio_bsau@mail.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5401-3179

Diana I. Gareeva
Ufa Branch of the Russian Academy of Sciences, Bashkir State Agrarian Institute; Bashkir State Pedagogical Institute named after M. Akmulla
71, Oktyabrya Ave., Ufa, 450054, Russian Federation; 3a, Oktiabrskoi revolutsii Str., Ufa, 450008, Russian Federation
diana.razgar@mail.ru
ORCID: https://orcid.org/0009-0008-8279-6538

Niyaz R. Subkhankulov
Ufa Branch of the Russian Academy of Sciences, Bashkir State Agrarian Institute
71, Oktyabrya Ave., Ufa, 450054, Russian Federation
niyazsubhankulov@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5038-2551

Vladimir I. Kosilov
Orenburg State Agrarian University
18, Cheliuskintsev Str., Orenburg, 460014, Russian Federation
kosilov_vi@bk.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4754-1771

Dmitry N. Zorin
Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev
49, Timiryazevskaya Str., Moscow, 127550, Russian Federation
Ethodmitry@mail.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5189-1355

Marianna Yu. Gladkikh
Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev
49, Timiryazevskaya Str., Moscow, 127550, Russian Federation
marianna.gladkikh@rgau-msha.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2304-6058

Marina I. Selionova

Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev
49, Timiryazevskaya Str., Moscow, 127550, Russian Federation
selionova@rgau-msha.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9501-8080

Поступила 07.11.2024 Received 07.11.2024
После рецензирования 15.01.2025 Revised 15.01.2025
Принята 13.02.2025 Accepted 13.02.2025

ЗЕМЛЕДЕЛИЕ И ЗАЩИТА РАСТЕНИЙ

SOIL FERTILITY AND PLANT PROTECTION

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-4-1100 **EDN: TQLSFD**
UDC 632.937:632.95:631.461

Original article

MULTIANTAGONISTIC OF *STREPTOMYCES NARBONENSIS* STRAIN PSM242 AND *TRICHODERMA* SP. BIOCIDE COMBINED IN ENRICH MEDIA AGAINST *MELOIDOGYNE* SP. ROOT-KNOT NEMATODE ON CHERRY TOMATO PLANTS

P. Suryaminarsih, S.R. Lestari

Abstract

The research focuses on the isolation and identification of *Streptomyces* and *Meloidogyne* species from soil and plant samples, particularly in oil palm plantations and tomato crops. Using the soil plating method, two *Streptomyces* isolates were obtained, identified as *Streptomyces narbonensis* through molecular techniques targeting the 16S rRNA gene. Concurrently, root-knot nematodes (*Meloidogyne* sp.) were extracted from symptomatic tomato plants using a modified Baerman apparatus, with morphological characteristics confirming their identity. The study further evaluates the biocontrol potential of *S. narbonensis* strain PSM242 and *Trichoderma* sp. against *Meloidogyne* sp. through both in vitro and field experiments. Results indicate that these biocontrol agents significantly reduce nematode populations and root gall formation, leading to enhanced growth metrics in cherry tomato plants. A factorial randomized block design was employed for data analysis, revealing that the combination of *S. narbonensis* and *Trichoderma* sp. in nutrient-enriched media yielded optimal results in controlling nematodes. Statistical analyses demonstrated that treatments combining both biocontrol agents resulted in the lowest gall diameter, weight, and juvenile nematode populations compared to controls. Additionally, significant improvements in root

length and fruit weight were observed in treated plants. This research underscores the potential of utilizing microbial antagonists as sustainable alternatives for managing agricultural pests, contributing to more effective pest control strategies in crop production systems.

Keywords: *Streptomyces; Trichoderma; Meloidogyne;* Biocontrol; Enrich Media

For citation. Suryaminarsih, P., & Lestari, S. R. (2025). Multiantagonistic of *Streptomyces narbonensis* strain PSM242 and *Trichoderma* sp. biocide combined in enrich media against *Meloidogyne* sp. root-knot nematode on cherry tomato plants. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(4), 250-268. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-4-1100

Introduction

An essential type of plant-disturbing organism that often attacks tomato plantations is the root-knot nematode caused by the nematode *Meloidogyne* sp. [1]. This nematode causes swelling of the roots (root-knot). Losses caused by the nematodes *Meloidygene* sp. can reduce tomato plant productivity by 20% to 40% [2]. Isolation and screening of *Streptomyces* sp. and *Trichoderma* sp. in tomato fields that often use pesticides found isolates that produce chitin, have antibiosis against fungi, and act as a bioinsecticide for several insects. Research [3] reported that the isolates of *T. harzianum* could control the root-knot nematode *M. javanica* by increasing plant growth, reducing the ability of nematodes to reproduce, and inhibiting the formation of galls on the roots of host plants. The results of a review of *T. harzianum* explained that this fungus is widely used as a biological agent for plant pests and diseases [4; 5]. The nematicidal activity of teleocidin B4 isolated from *S. narbonensis* can control the pinewood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus* [6]. The results of an in vivo study revealed the potential of the nematicide *S. hydrogenans* to control root galls effectively, egg mass in tomato plants infested with nematodes, and at the same time promote the growth of tomato plants [7]. *S. narbonensis* produces Chitinase, which can degrade chitin in the cell walls of insect larvae *M. incognita* in vitro [8].

The combination of the biological agent *Trichoderma viridae* with *Pseudomomans florencens* increases the biocontrol effect on *M. javanica* activity compared to the administration of fungi and bacteria that stand alone [9]. The report shows that the 5:1 combination of *S. narbonensis* and *T. harzianum* on Potato Dextrose Extract media produces chitinase enzymes that can hydrolyze chitin cells [10; 11]. An important factor that affects the growth of biological agents is the nutrient content of the propagation or production

media [12; 13]. The type of propagation media will affect the level of ability of biological agents to control root-knot nematodes. Therefore, research was conducted on the potential ability of *T. harzianum* and *S. narbonensis* combine as a natural agent in the use of various culture mediums, namely EKG media (Potato Dextrose Extract), GN (Glucose nitrate), and coconut water (CW) in vitro.

Samples and research methods

Exploration of Streptomyces strains

Streptomyces isolates were obtained from soil collected around oil palm plantations using the soil plating method. A 1 g soil sample was weighed and prepared as a suspension with a 10^{-4} dilution. From this suspension, 1 mL was aseptically transferred selective media *Streptomyces* Isolation Medium Potato (SC) containing glucose, L-glutamic acid, K_2HPO_4, $MgSO_4 \cdot 7H_2O$, NaCl, $FeSO_4 \cdot 7H_2O$, agar, and nystatin in a petri dish [14]. The isolated Streptomyces were then purified and cultured on SC medium in both petri dishes and test tubes for further propagation.

Molecular Identification of Streptomyces strains

Genomic DNA was extracted using the Presto™ Mini gDNA Bacterial Kit (Geneaid, USA) following standard protocols. Amplification of the 16S rRNA gene was performed using the primers 63F (5'-CAGGCCTAACACATGCAAGTC-3') and 1387R (5'-GGGCGGWGTGTACAAGGC-3'). The PCR reaction mixture contained 1 µL of GoTaq® Green Ready Mix (Promega, USA), 0.5 µM of each primer, 10 µg of genomic DNA, and nuclease-free water, with a final volume of 50 µL. PCR products were resolved on a 1% agarose gel at 80 V for 45 minutes, and DNA bands were visualized using a UV transilluminator after EtBr staining. The amplified DNA was sent to a sequencing service provider for nucleotide sequencing. The sequencing data were analyzed using SeqTrace software and aligned with GenBank® database sequences using the BLASTn tool available on the NCBI website (http://www.ncbi.nlm.nih.gov).

Extraction of Meloidogyne sp.

Rhizosphere soil and root samples were explored from tomato plantations at the tomato production center in Pasuruan, Indonesia. Root sampling was carried out by purposive sampling on plants that experienced symptoms of root-knot nematode attack in the form of yellow wilting on the leaves and the formation of galls or root swelling [15]. Soil sampling was carried out in the root area of symptomatic plants of about 500 grams of soil/plant. Isolation of root-knot

nematodes by extraction-isolation method Modified Baerman apparatus. The identification method was a morphometric method to observe the morphology and characteristics of the nematodes.

Extraction The results of the exploration of root-knot nematodes were symptomatic roots and soil in the root area. Furthermore, in the extraction - isolation with a modified Baerman technique [16] for ± 24 hours. Then the nematode isolates were filtered using a nematode filter of 100, 250, and 500 mesh. The filtering results were observed using a stereomicroscope, and then morphometric identification was carried out using a compound microscope (Olympus CX33) at 400x magnification.

Egg Mass Collection

The inoculum was prepared from previously collected root and soil samples. About 1 kg of tomato roots was cut into 1–2 cm pieces and placed in a test tube containing 2% NaOCl solution [17]. The test tube was shaken for 5 minutes to extract Meloidogyne sp. eggs. The extracted eggs were filtered using a 500-mesh sieve and rinsed thoroughly with distilled water to remove any remaining NaOCl. The collected eggs were transferred to a petri dish containing 10 mL of sterile distilled water and incubated in the dark. After 7 days of incubation, the hatched J2 stage Meloidogyne sp. was used for further experiments

Purification of Trichoderma sp.

Trichoderma isolates were obtained from the collection of the Plant Health Laboratory, Universitas Pembangunan Nasional Veteran Jawa Timur. The *Trichoderma* isolate used was recorded under the name *Trichoderma* sp. strain K9302. *Trichoderma* sp. was purified by taking *Trichoderma* isolates with a diameter of 10 mm and then growing them on PDA media.

Preparation Biocide of S. narbonensis strain PSM242 and Trichoderma sp. Combine in Enrich Mediums

The preparation of the biocide involved culturing 10^7 CFU/ml *S. narbonensis* strain PSM242 and *Trichoderma* sp. isolates in 100 mL of Potato Glucose Extract (EKG) medium. The resulting suspensions of *S. narbonensis* strain PSM242 and *Trichoderma* sp. were utilized in the subsequent stage. One milliliter of each suspension was added to 99 mL of EKG medium [18] enriched with additional nutrients. The nutrients used for enrichment were glucose nitrate and coconut water, each at a concentration of 10 ppm.

S. narbonensis strain PSM242 and Trichoderma sp. against Meloidogyne sp. In Vitro

150 J2 *Meloidogyne* sp. in 4 mL of suspension was put into a 5 cm diameter petri dish. Each suspension of *S. narbonensis* strain PSM242 and *Trich-*

oderma sp. as much as 1 mL was poured into the petri dish according to the treatment. Furthermore, the treated nematodes were incubated for 24 hours at a temperature of 28°C in a dark room. After 24 hours of incubation, the nematode suspension was dripped with 100 L of 1 N NaOH to activate the inactivated nematodes [19; 20]. Active nematodes showed a wavy phenotype, while dead nematodes showed an upright and stiff body position after 5 minutes of administration of 1 N NaOH.

S. narbonensis strain PSM242 and Trichoderma sp. against Meloidogyne sp. in Land Experiment

The parasitization ability test of the combination of *S. narbonensis* strain PSM242 and *Trichoderma* sp. on several types of production media was conducted at the Plant and Land Health Laboratory, Faculty of Agriculture, Department of Agrotechnology, East Java Veteran National Development University. Cherry tomato seeds were sown in soil and compost media with a ratio of 1:2 using a pot tray for 21-28 days. After that, the plants were transferred into 35 cm x 35 cm polybags containing soil and compost. 3 days after planting (DAP), inoculate ± 1000 nematode eggs on the roots of cherry tomato plants (Wulandari et al., 2019). Then inoculate *S. narbonensis* strain PSM242 and *Trichoderma* sp. according to the predetermined treatment combination as much as 20 ml. Observations were made in the generative phase to see the inhibition of root nodule formation on the roots, the population level of root nodule nematodes on the roots, and agronomic aspects including root length, root weight, and fruit weight. Nematode population analysis was carried out by extraction-isolation of *Meloidogyne* sp. juvenile phase 2 (J2) using a modified Baerman technique [16].

Data analysis

The experiment used a split-plot design in a factorial randomized block design (RBD), with the first factor being the concentration of *S. narbonensis* strain PSM242 and *Trichoderma* sp. The second factor is the type of culture medium. Data analysis using (ANOVA), and further tested using the DMRT test with 95% confidence level.

Results and discussion

Isolation and identification of Streptomyces strain

Two isolates of *Streptomyces* were obtained from soil samples. Microscopic and macroscopic identification was carried out on the isolates that had been obtained. The morphological characteristics of *Streptomyces* isolates are presented macroscopically in Table 1 and microscopically in Figure 1.

Table 1.

Morphological characteristics of *Streptomyces* isolates

Bacterial strain	Colony morphology					Gram
	Shape	Color	Surface	Edge	Width (mm)	
PSM241	Filamentous	Yellowish	Pulvinate	Filiform	1-2	+
PSM242	Filamentous	White	Convex	Filiform	1-2	+

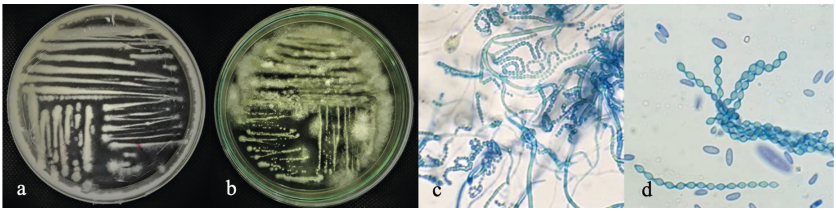
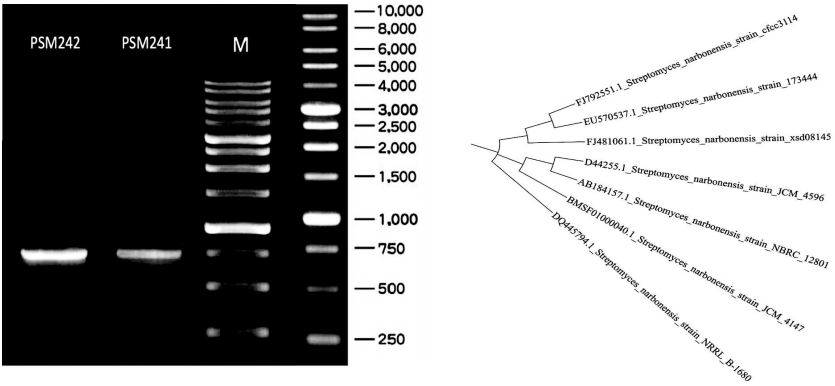


Fig. 1. Morphology characteristic a) macroscopic PSM241; b) macroscopic PSM242; c) hyphae structure of Streptomyces strain; d) spores of Streptomyces strain

The two isolates were identified molecularly based on the 16S rRNA gene. Analysis of the 16S rRNA gene showed that strain PSM241 had 96% similarity to *Streptomyces narbonensis* strain NBRC 12801, and strain PSM242 had 100% similarity to *Streptomyces narbonensis* strain NRRL B-1680 (Table 2, Figure 2). Strain PSM242 was selected and used for biocide formulation.



a b

Fig. 2. (a) Visualization of agarose gel electrophoresis amplified the 16S rRNA gene of PSM241 and PSM242 strain (DNA Ladder 10.000 bp), (b) circular phylogenetic tree with Neighbor-Joining Method and Jones-Taylor-Thorthon (JTT) substitution model

Table 2.

Identification of *Streptomyces* isolates

Bacterial strain	Homology (%)	Species database on GenBank	Accession no.
PSM241	96	*Streptomyces narbonensis* strain NBRC 12801	AB184157.1
PSM242	100	*Streptomyces narbonensis* strain NRRL B-1680	DQ445794.1

Extraction and identification of root-knot nematodes

Morphological observations showed that the nematode eggs were round and elongated. The nematode larvae were elongated and slender with a slender tail. There was a straight stylet and a clear basal knob, the adult male nematode was elongated with a short tail. In contrast, the female nematode had a rounded body shape like a pear, with a short neck and no tail. Adult male nematodes are elongated and longer than females with variations in the length of up to 2 mm, moving slowly, tails are short and rounded, and heads are not notched. The female nematode has a pear-like shape, does not have a tail, and a short neck, more than 0.5 mm long and 0.3 - 0.4 mm wide. In terms of size, female nematodes have a larger diameter than male nematodes (Figure 3). Based on these morphological characteristics, it can be identified that the root knot nematodes found are *Meloidogyne* sp.



Fig. 3. Meloidogyne morphological identification a) egg; b) juvenile; c) basal knob of male nematode; d) male infective larval; e) female infective larval

In Vitro Experiment S. narbonensis strain PSM242 and Trichoderma sp. against Meloidogyne sp.

S. narbonensis strain PSM242 and *Trichoderma* sp. were grown in EKG media enriched with glucose nitrate and coconut water. Mortality of adult *Meloidogyne* sp. samples was observed in this in vitro test. The results showed that *S. narbonensis* strain PSM242 and *Trichoderma* sp. grown in enriching EKG have nematicidal ability and successfully kill root-knot nematodes *Meloidogyne* sp. Mortality of *Meloidogyne* sp. in the in vitro test is presented in Figure 4.

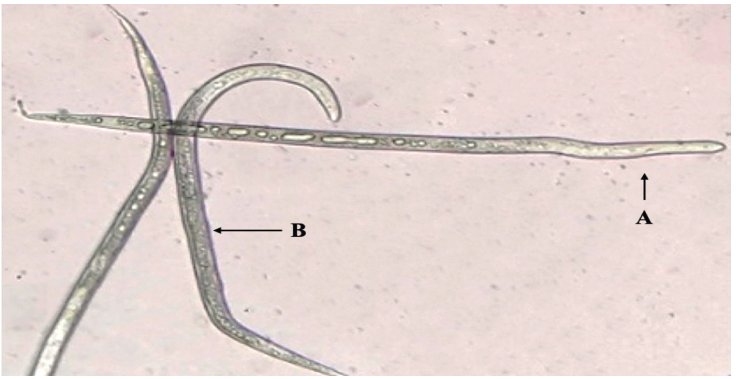


Fig. 4. Microscopic appearance of a) dead body, and b) living body of Meloidogyne sp.

Effect of S. narbonensis strain PSM242 and Trichoderma sp. against Meloidogyne sp.

Quantitatively, gall diameter, gall weight, and population of *Meloidogyne* sp. aged juvenile 2 were calculated to observe the effect of *S. narbonensis* strain PSM242 and *Trichoderma* sp. treatment with a mixture of EKG medium enrichment. The results of these measurements are presented in Table 3.

Table 3.

Effect of *S. narbonensis* strain PSM242 and *Trichoderma* sp. on gall diameters, gall weight, and population of juvenil 2 *Meloidogyne* sp.

Treatments	Gall Diameter (mm)	Gall Weight (g)	J2 Population Average
Control (-) without treatments	9.33 f	74.50 d	247.02 h
Control (+) *S. narbonensis* + *Trichoderma* sp.	6.00 d	18.00 b	80,30 de
Trichoderma sp.+ EKG	7.33 e	27.50 c	142.54 g
Trichoderma sp. + EKG + GN	7.00 de	25.80 c	123.97 fg
Trichoderma sp. + EKG + CW	6.67 de	20.03 bc	93.17 e
S. narbonensis + EKG	7.33 e	27.60 c	139.81 g
S. narbonensis + EKG + GN	7.00 de	25.00 c	114.53 f
S. narbonensis + EKG + CW	6.33 d	17.33 b	85.83 de
S. narbonensis + *Trichoderma* sp. 2:2 + EKG	4.00 b	10.03 ab	21.05 b
S. narbonensis + *Trichoderma* sp. 2:2 + EKG + GN	4.00 b	9.37 ab	10.86 a
S. narbonensis + *Trichoderma* sp. 2:2 + EKG + CW	1.33 a	4.30 a	6.10 a
S. narbonensis + *Trichoderma* sp. 1:3 + EKG	5.67 cd	17.17 b	75.80 d

S. narbonensis + *Trichoderma* sp. 1:3 + EKG + GN	5.33 c	15.83 b	51.95 c
S. narbonensis + *Trichoderma* sp. 1:3 + EKG + CW	5.33 c	14.77 b	30.23 bc

Note: The numbers in the column followed by the same letter indicate that there is no significant difference in the DMRT test at the 95% confidence level.

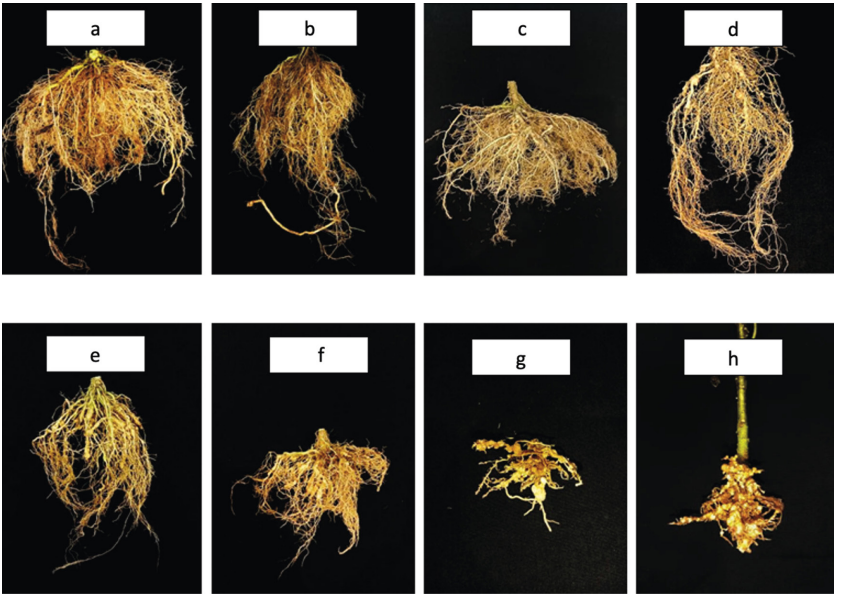


Fig. 5. Growth of infected cherry tomato roots a) *S. narbonensis* + *Trichoderma* sp. 2:2 + EKG + CW; b) *S. narbonensis* + *Trichoderma* sp. 2:2 + EKG + GN; c) *S. narbonensis* + *Trichoderma* sp. 2:2 + EKG; d) *S. narbonensis* + *Trichoderma* sp. 1:3 + EKG + CW; e) *S. narbonensis* + EKG + CW; f) Control (+) *S. narbonensis* + *Trichoderma* sp.; g) *Trichoderma* sp. + EKG + CW; h) Control (-) without treatments

Table 3 shows the lowest gall diameter, gall weight, and J2 population of *Meloidogyne* sp. were in the *S. narbonensis* + *Trichoderma* sp. 1:3 + EKG + CW treatment, namely with a gall diameter of 1.33 mm, a gall weight of 4.30 g, and an average J2 population of 6.10 root-knot nematodes. The highest results were in the negative control treatment or without any treatment, with a gall diameter of 9.33 mm, a gall weight of 74.50 g, and an average J2 population of 247.02. In general, Table 3 provides information that providing additional nutrients to the EKG medium reduces gall diameter, gall weight, and the average J2 population. When compared to the *S. narbonensis* + *Trichoderma* sp. 1:3 and *S. narbonensis* + *Trichoderma* sp. 2:2 treatments, the lowest values of J2 population, gall weight,

and diameter were possessed by the addition of nutrients to the EKG medium. Meanwhile, when compared between multi-antagonistic *S. narbonensis* + *Trichoderma* sp. with the treatment of *S. narbonensis* or *Trichoderma* sp. individually, it shows that the lowest suppression is possessed by the combined treatment of *S. narbonensis* + *Trichoderma* sp. The observation of the form of gall infection *Meloidogyne* sp. on the roots of cherry tomato plants is presented in Figure 5.

Effect of S. narbonensis strain PSM242 and Trichoderma sp. on Cherry Tomato Plant

The effect of *S. narbonensis* strain PSM242 and *Trichoderma* sp. on the growth of cherry tomato plants was also observed. Data on root length and root weight are presented in Table 4 and data on average fruit weight are presented in Table 5.

Table 4.

Effect of *S. narbonensis strain PSM242 and Trichoderma sp.* in enriching media on plant root growth

Treatment	Root Length (cm)	Root Weight (g)
Control (-) without treatments	6.60 a	15.44 a
Control (+) *S. narbonensis* + *Trichoderma* sp.	24.27 b	44.13 b
Trichoderma sp.+ EKG	18.27 ab	23.34 a
Trichoderma sp. + EKG + GN	22.60 ab	40.65 b
Trichoderma sp. + EKG + CW	22.80 ab	43.35 b
S. narbonensis + EKG	22.37 ab	23.34 a
S. narbonensis + EKG + GN	20.70 ab	42.88 b
S. narbonensis + EKG + CW	24.27 b	49.93 b
S. narbonensis + *Trichoderma* sp. 2:2 + EKG	32.69 bc	77.82 c
S. narbonensis + *Trichoderma* sp. 2:2 + EKG + GN	37.60 bc	117.91 d
S. narbonensis + *Trichoderma* sp. 2:2 + EKG + CW	42.57 c	165.37 e
S. narbonensis + *Trichoderma* sp. 1:3 + EKG	23.13 ab	54.52 bc
S. narbonensis + *Trichoderma* sp. 1:3 + EKG + GN	26.30 bc	54.69 bc
S. narbonensis + *Trichoderma* sp. 1:3 + EKG + CW	29.30 bc	69.89 c

Note: The numbers in the column followed by the same letter indicate that there is no significant difference in the DMRT test at the 95% confidence level.

Table 4 shows that the longest and heaviest roots were found in the treatment of adding coconut water to the EKG media, namely 42.57 cm and 165.67 g. While the lowest weight and shortest roots were found in the negative control

treatment or without any treatment. When compared with the treatments of *S. narbonensis* + *Trichoderma* sp. 1:3 and *S. narbonensis* + *Trichoderma* sp. 2:2, the highest root length and weight values were possessed by the addition of nutrients to the EKG media. Meanwhile, when comparing the multi antagonist *S. narbonensis* + *Trichoderma* sp. with the treatment of *S. narbonensis* or *Trichoderma* sp. individually, it shows that the highest root growth was possessed by the combined treatment of *S. narbonensis* + *Trichoderma* sp.

Table 5.

Effect of *S. narbonensis strain PSM242 and Trichoderma sp.* in enriching media on cherry tomato fruit weight

Treatments	Fruit Weight (g/plant)
Control (-) without treatments	32.86 a
Control (+) *S. narbonensis* + *Trichoderma* sp.	127.00 b
Trichoderma sp.+ EKG	116,77 b
Trichoderma sp. + EKG + GN	132,61 b
Trichoderma sp. + EKG + CW	136,00 b
S. narbonensis + EKG	122.33 b
S. narbonensis + EKG + GN	127.80 b
S. narbonensis + EKG + CW	135.30 b
S. narbonensis + *Trichoderma* sp. 2:2 + EKG	235.76 c
S. narbonensis + *Trichoderma* sp. 2:2 + EKG + GN	239.52 c
S. narbonensis + *Trichoderma* sp. 2:2 + EKG + CW	241.36 c
S. narbonensis + *Trichoderma* sp. 1:3 + EKG	212.64 c
S. narbonensis + *Trichoderma* sp. 1:3 + EKG + GN	220.47 c
S. narbonensis + *Trichoderma* sp. 1:3 + EKG + CW	225.75 c

Note: The numbers in the column followed by the same letter indicate that there is no significant difference in the DMRT test at the 95% confidence level.

Table 5 shows that the highest fruit weight was in the treatment of *S. narbonensis* + *Trichoderma* sp. 2:2 + EKG + CW with a value of 241.36 g per plant. The second and third highest fruit weights were in the treatment of *S. narbonensis* + *Trichoderma* sp. 2:2 + EKG + GN with a value of 239.52 g, and *S. narbonensis* + *Trichoderma* sp. 2:2 + EKG with a value of 235.76 g. While the lowest weight was in the negative control treatment or without treatment with a value of 32.86 g.

Discussion

Root-knot nematodes cause significant damage to plants, including stunted growth, nutrient deficiencies, leaf browning, premature wilting, root rot, re-

duced photosynthetic pigment levels, and poor fruit quality, ultimately leading to production losses and shortened shelf life [21]. Numerous studies have focused on the biological control of plant-parasitic nematodes, particularly *Meloidogyne* sp. [21; 22; 23].

This study highlights the potential of combining *S. narbonensis* strain PSM242 and *Trichoderma* sp. with enriching EKG culture media as a biological agent to suppress *Meloidogyne* sp. reproduction and inhibit gall formation on the roots of cherry tomato plants. Both *S. narbonensis* strain PSM242 and *Trichoderma* sp. significantly reduced the gall index and the population of J2 *Meloidogyne* sp. in infected plant tissues. Research [24; 25; 26] demonstrated that *T. harzianum* effectively controls *Meloidogyne javanica* by inhibiting reproduction, suppressing gall formation, and enhancing host plant growth. Additionally, the *Streptomyces* group has been shown to delay the nematode's life cycle in root tissues, thereby reducing population levels [7; 26; 27]. Report [7; 28] shows that the combination of *Streptomyces* sp. significantly decreased root nodule formation and nematode population density in tomato seedling roots. Nematicidal actinomycete [29; 30] reduced *Meloidogyne incognita*-induced root nodule disease by 71.93% in chili plants, while also improving plant growth by enhancing shoot and root length, weight, and fruit yield.

Tomato plant roots treated with biological agents exhibited greater weight than untreated roots (Table 4). Colonization by a mixture of *T. harzianum* and *G. virens* nitrates was particularly noticeable at the root base [8]. *Streptomyces* species promote plant growth through the production of indole-3-acetic acid (IAA), which stimulates root growth and the production of siderophores [31; 32]. IAA, a phytohormone produced by nematicidal microorganisms, enhances lateral and adventitious root growth, increasing mineral and nutrient uptake [33; 34]. Additionally, *Streptomyces* sp. improve nutrient availability by producing siderophores and solubilizing phosphate, converting complex soil nutrients into simpler forms for plant uptake [35].

Several types of nutrients play an important role in regulating the production of essential enzymes such as proteases and chitinases, which are essential for controlling nematodes [36]. Protease enzymes, for example, degrade proteins, the main components of nematodes and their eggs. Studies [36; 37] have shown that microbes capable of producing proteases are more effective in controlling *Meloidogyne* sp. compared to those without this ability. Regulation of protease production in microbes depends on the availability of phosphorus, which acts as an effector, and amino acids, which function as inhibitors when protease levels are excessive [38]. Pure coconut water con-

tains phosphorus and amino acids, making it a potential source of nutrients to increase protease activity [39; 40].

Similarly, chitinase enzymes are essential in controlling nematodes, because the body wall and eggs of nematodes contain chitin [41; 42; 43]. The combined activity of proteases and chitinases can degrade the structural integrity of nematodes, leading to their death [36; 44]. The composition of the media significantly affects the effectiveness of *S. narbonensis* strain PSM242 and *Trichoderma* sp. as biological agents. The use of EKG media with additional nutrients in the form of glucose nitrate and coconut water has been shown to support the metabolic processes of *S. narbonensis* strain PSM242 and *Trichoderma* sp. according to the literature study.

The results of the observation showed that the combination of *S. narbonensis* strain PSM242 and *Trichoderma* sp. with the appropriate culture media effectively inhibited nematode attacks and increased the growth of plants attacked by root-knot nematodes (Table 3). This treatment significantly increased plant production. Studies have reported that tomato seedling roots treated with *T. harzianum* and *Streptomyces* sp. developed root branches within 24 hours after inoculation [8; 45]. In addition, the administration of *Trichoderma* sp. and *Streptomyces* sp. increased cherry tomato production compared to untreated plants. This increase was due to the production of the root growth hormone IAA by *Trichoderma* sp. and *Streptomyces* sp., which promoted root development and fruit yield [46; 47; 48]. Bioagents such as *Bacillus, Pseudomonas, Streptomyces*, and *Trichoderma* are effective against root-knot nematodes, increasing healthy tomato fruit yield by 19%–66% [49; 50; 51].

Conclusion

The study successfully isolated *Streptomyces narbonensis* strain PSM242 and *Trichoderma* sp. from soil and demonstrated their effectiveness as biocontrol agents against root-knot nematodes (*Meloidogyne* sp.). In vitro experiments indicated significant nematicidal activity, with the combination treatment resulting in the lowest gall diameter (1.33 mm), gall weight (4.30 g), and juvenile nematode populations (6.10). Additionally, treated cherry tomato plants exhibited enhanced growth, with the longest roots measuring 42.57 cm and the highest fruit weight reaching 165.37 g. These findings support the potential of using microbial antagonists for sustainable agricultural pest management.

References

1. Pontes, K. B., et al. (2024). Efficacy of microbiological nematicides in controlling root-knot nematodes in tomato. *Frontiers in Agronomy*, *6*. https://doi.org/10.3389/fagro.2024.1462323. EDN: https://elibrary.ru/JLEPOM

2. Yigezu Wendimu, G. (2021). Biology, taxonomy, and management of the root-knot nematode (*Meloidogyne incognita*) in sweet potato. *Advances in Agriculture*, *2021*. https://doi.org/10.1155/2021/8820211. EDN: https://elibrary.ru/IIJGDI
3. Saleh, H. M., Shafeeq, A. F., & Khairi, M. A. (2023). Short communication: Biological control of *Meloidogyne javanica* by *Pasteuria penetrans* and *Trichoderma harzianum* on tomato plants. *Biodiversitas*, *24*(2), 847–851. https://doi.org/10.13057/biodiv/d240221
4. Puyam, A. (2016). Advent of *Trichoderma* as a bio-control agent — a review. Retrieved from: www.ansfoundation.org
5. Yao, X., Guo, H., Zhang, K., Zhao, M., Ruan, J., & Chen, J. (2023). *Trichoderma* and its role in biological control of plant fungal and nematode disease. *Frontiers in Microbiology*, *14*. https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1160551. EDN: https://elibrary.ru/MRQFOV
6. Kang, M. K., et al. (2021). Nematicidal activity of teleocidin B4 isolated from *Streptomyces* sp. against pine wood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus*. *Pest Management Science*, *77*(4), 1607–1615. https://doi.org/10.1002/ps.6095. EDN: https://elibrary.ru/YXAVID
7. Sharma, N., Manhas, R. K., & Ohri, P. (2022). *Streptomyces hydrogenans* strain DH-16 alleviates negative impact of *Meloidogyne incognita* stress by modifying physio-biochemical attributes in *Solanum lycopersicum* plants. *Scientific Reports*, *12*(1), 15214. https://doi.org/10.1038/s41598-022-19636-0. EDN: https://elibrary.ru/OJSAUR
8. Suryaminarsih, P., Mindari, W., Wijayanti, F., & Kusuma, R. M. (2022). The competence of *Streptomyces narbonensis* and *Trichoderma harzianum* mixed as PGPM and decomposer on different types of soils. *International Journal of Plant and Soil Science*, 158–165. https://doi.org/10.9734/ijpss/2022/v34i1831067. EDN: https://elibrary.ru/LCUCDM
9. Rostami, M., Shahbazi, S., Soleimani, R., & Ghorbani, A. (2024). Optimizing sustainable control of *Meloidogyne javanica* in tomato plants through gamma radiation-induced mutants of *Trichoderma harzianum* and *Bacillus velezensis*. *Scientific Reports*, *14*(1). https://doi.org/10.1038/s41598-024-68365-z. EDN: https://elibrary.ru/LKWTXF
10. Mohiddin, F. A., et al. (2021). Phylogeny and optimization of *Trichoderma harzianum* for chitinase production: Evaluation of their antifungal behaviour against the prominent soil-borne phytopathogens of temperate India. *Microorganisms*, *9*(9). https://doi.org/10.3390/microorganisms9091962. EDN: https://elibrary.ru/KMNPQO

11. Rosyida, R., Martosudiro, M., & Muhibuddin, A. (2Desktop). Analysis of chitinase enzyme *Trichoderma* sp. in degrading *Fusarium oxysporum*. *Research Journal of Life Science*, *9*(3), 131–145. https://doi.org/10.21776/ub.rjls.2022.009.03.5. EDN: https://elibrary.ru/GLGOFJ
12. Indriyanti, D. R., Bintari, S. H., Setiati, N., & Alfiyan, J. M. Z. (2021). The density and viability of *Metarhizium anisopliae* conidia on several growth media. *Biosaintifika*, *13*(2), 237–242. https://doi.org/10.15294/biosaintifika.v13i2.31408. EDN: https://elibrary.ru/DFBSBO
13. Pasternak, T. P., & Steinmacher, D. (2024). Plant growth regulation in cell and tissue culture in vitro. *Plants*, *13*(2). https://doi.org/10.3390/plants13020327. EDN: https://elibrary.ru/UMAJOM
14. Lee, H.-B., et al. (2005). Study on medium ingredient composition for enhancing biomass production and anti-potato common scab activity of *Streptomyces* sp. A020645 as a BCA candidate. *Research in Plant Disease*, *11*(1), 66–71. https://doi.org/10.5423/rpd.2005.11.1.066
15. Asyiah, I. N., et al. (2021). Cost-effective bacteria-based bionematicide formula to control root-knot nematode *Meloidogyne* spp. in tomato plants. *Biodiversitas*, *22*(6), 3256–3264. https://doi.org/10.13057/BIODIV/D220630. EDN: https://elibrary.ru/YLJFFD
16. Stetina, S. R., Mcgawley, E. C., & Russin, J. S. (1997). Extraction of root-associated *Meloidogyne incognita* and *Rotylenchulus reniformis*.
17. Gómez-González, G., et al. (2021). *Meloidogyne enterolobii* egg extraction in NaOCl versus infectivity of inoculum on cucumber. *Journal of Nematology*, *53*. https://doi.org/10.21307/JOFNEM-2021-057. EDN: https://elibrary.ru/UWEYNG
18. Rahmawati, D., et al. (2016). *Seminar Hasil Penelitian dan Pengabdian Masyarakat Dana BOPTN Tahun*.
19. Xiang, N., & Lawrence, K. S. (2016). Optimization of in vitro techniques for distinguishing between live and dead second stage juveniles of *Heterodera glycines* and *Meloidogyne incognita*. *PLOS ONE*, *11*(5). https://doi.org/10.1371/journal.pone.0154818
20. Adiwena, M., et al. (2023). Effect of micronutrient-enriched media on the efficacy of *Bacillus subtilis* as a biological control agent against *Meloidogyne incognita*. *Biodiversitas*, *24*(1), 33–39. https://doi.org/10.13057/biodiv/d240105. EDN: https://elibrary.ru/TKSCAO
21. Cao, Y., et al. (2023). Root-knot nematode infections and soil characteristics significantly affected microbial community composition and assembly of tobacco soil microbiota: A large-scale comparison in tobacco-growing areas. *Frontiers*

in Microbiology, *14*. https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1282609. EDN: https://elibrary.ru/MCGLXV

22. Poveda, J., Abril-Urias, P., & Escobar, C. (2020). Biological control of plant-parasitic nematodes by filamentous fungi inducers of resistance: *Trichoderma*, mycorrhizal and endophytic fungi. *Frontiers in Microbiology*, *11*. https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.00992. EDN: https://elibrary.ru/WSWUDU
23. Ayaz, M., et al. (2024). Biocontrol of plant parasitic nematodes by bacteria and fungi: A multi-omics approach for the exploration of novel nematicides in sustainable agriculture. *Frontiers in Microbiology*, *15*. https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1433716. EDN: https://elibrary.ru/BUMJNO
24. Sharon, E., Bar-Eyal, M., Chet, I., Herrera-Estrella, A., Kleifeld, O., & Spiegel, Y. (2001). Biological control of the root-knot nematode *Meloidogyne javanica* by *Trichoderma harzianum*.
25. Al-Hazmi, A. S., & Javeed, M. T. (2016). Effects of different inoculum densities of *Trichoderma harzianum* and *Trichoderma viride* against *Meloidogyne javanica* on tomato. *Saudi Journal of Biological Sciences*, *23*(2), 288–292. https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2015.04.007
26. Rostami, M., Shahbazi, S., Soleimani, R., & Ghorbani, A. (2024). Optimizing sustainable control of *Meloidogyne javanica* in tomato plants through gamma radiation-induced mutants of *Trichoderma harzianum* and *Bacillus velezensis*. *Scientific Reports*, *14*(1). https://doi.org/10.1038/s41598-024-68365-z. EDN: https://elibrary.ru/LKWTXF
27. Sharma, N., et al. (2020). Insights into the role of *Streptomyces hydrogenans* as the plant growth promoter, photosynthetic pigment enhancer and biocontrol agent against *Meloidogyne incognita* in *Solanum lycopersicum* seedlings. *Plants*, *9*(9), 1–18. https://doi.org/10.3390/plants9091109. EDN: https://elibrary.ru/LUPQJL
28. Park, E. J., et al. (2020). Evaluation of nematicidal activity of *Streptomyces yatensis* KRA-28 against *Meloidogyne incognita*. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, *30*(5), 700–707. https://doi.org/10.4014/jmb.1908.08038. EDN: https://elibrary.ru/LISEMJ
29. Silva, G. da C., Kitano, I. T., Ribeiro, I. A. de F., & Lacava, P. T. (2022). The potential use of actinomycetes as microbial inoculants and biopesticides in agriculture. *Frontiers in Soil Science*, *2*. https://doi.org/10.3389/fsoil.2022.833181
30. Ran, Y., Zhang, Y., Wang, X., & Li, G. (2022). Nematicidal metabolites from the actinomycete *Micromonospora* sp. WH06. *Microorganisms*, *10*(11). https://doi.org/10.3390/microorganisms10112274. EDN: https://elibrary.ru/ETFIDY
31. Wahyudi, A. T., Priyanto, J. A., Fijrina, H. N., Mariastuti, H. D., & Nawangsih, A. A. (2019). *Streptomyces* spp. from rhizosphere soil of maize with po-

tential as plant growth promoter. *Biodiversitas*, *20*(9), 2547–2553. https://doi.org/10.13057/biodiv/d200916

32. Omar, A. F., Abdelmageed, A. H. A., Al-Turki, A., Abdelhameid, N. M., Sayyed, R. Z., & Rehan, M. (2022). Exploring the plant growth-promotion of four *Streptomyces* strains from rhizosphere soil to enhance cucumber growth and yield. *Plants*, *11*(23). https://doi.org/10.3390/plants11233316. EDN: https://elibrary.ru/CFMVGB
33. Xu, L., Xu, W., Jiang, Y., Hu, F., & Li, H. (2015). Effects of interactions of auxin-producing bacteria and bacterial-feeding nematodes on regulation of peanut growths. *PLOS ONE*, *10*(4). https://doi.org/10.1371/journal.pone.0124361. EDN: https://elibrary.ru/XQDFUH
34. Sachman-Ruíz, B., et al. (2022). Nematicidal, acaricidal and plant growth-promoting activity of *Enterobacter* endophytic strains and identification of genes associated with these biological activities in the genomes. *Plants*, *11*(22). https://doi.org/10.3390/plants11223136. EDN: https://elibrary.ru/ESDKPI
35. Chouyia, F. E., Ventorino, V., & Pepe, O. (2022). Diversity, mechanisms and beneficial features of phosphate-solubilizing *Streptomyces* in sustainable agriculture: A review. *Frontiers in Plant Science*, *13*. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1035358. EDN: https://elibrary.ru/LZDCCT
36. Hu, H., Gao, Y., Li, X., Chen, S., Yan, S., & Tian, X. (2020). Identification and nematicidal characterization of proteases secreted by endophytic bacteria *Bacillus cereus* BCM2. *Phytopathology*, *110*(2), 336–344. https://doi.org/10.1094/PHYTO-05-19-0164-R. EDN: https://elibrary.ru/NWZSSR
37. Geng, C., et al. (2016). A novel serine protease, Sep1, from *Bacillus firmus* DS-1 has nematicidal activity and degrades multiple intestinal-associated nematode proteins. *Scientific Reports*, *6*. https://doi.org/10.1038/srep25012
38. Razzaq, A., et al. (2019). Microbial proteases applications. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, *7*. https://doi.org/10.3389/fbioe.2019.00110. EDN: https://elibrary.ru/RBPIMS
39. Lathro Anselme, A., Brou Roger, K., Grodji Albarin, G., Tacra Thierry, L., Konan Jean-Louis, K., & Konan Jean, K. (2019). Essentials minerals in coconut water sugars from five coconuts (*Cocos nucifera* L.) varieties cultivated in Côte d'Ivoire. *American Journal of Food and Nutrition*, *7*(3), 88–93. https://doi.org/10.12691/ajfn-7-3-3
40. Zhang, Y., et al. (2024). Chemical components, nutritional value, volatile organic compounds and biological activities in vitro of coconut (*Cocos nucifera* L.) water with different maturities. *Foods*, *13*(6). https://doi.org/10.3390/foods13060863. EDN: https://elibrary.ru/IYYPQG

41. Murthy, N., & Bleakley, B. (2012). Simplified method of preparing colloidal chitin used for screening of chitinase-producing microorganisms.
42. Sasi, A., Duraipandiyan, N., Marikani, K., Dhanasekaran, S., Al-Dayan, N., & Venugopal, D. (2020). Identification and characterization of a newly isolated chitinase-producing strain *Bacillus licheniformis* SSCL-10 for chitin degradation. *Archaea*, *2020*. https://doi.org/10.1155/2020/8844811. EDN: https://elibrary.ru/KZHQUM
43. Gonfa, T. G., Negessa, A. K., & Bulto, A. O. (2023). Isolation, screening, and identification of chitinase-producing bacterial strains from riverbank soils at Ambo, Western Ethiopia. *Heliyon*, *9*(11). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e21643. EDN: https://elibrary.ru/PLLXTO
44. Chen, L., et al. (2015). Enhanced nematicidal potential of the chitinase pachi from *Pseudomonas aeruginosa* in association with Cry21Aa. *Scientific Reports*, *5*. https://doi.org/10.1038/srep14395
45. Nawaal, N., Guniarti, G., Moeljani, I. R., & Suryaminarsih, P. (2022). Application of *Streptomyces* sp. and *Trichoderma* sp. for promoting generative plants growth of cherry tomato (*Lycopersicum cerasiformae* Mill.). *Planta Tropika: Jurnal Agrosains (Journal of Agro Science)*, *10*(2), 126–131. https://doi.org/10.18196/pt.v10i2.11706. EDN: https://elibrary.ru/ELWGTM
46. Vinod Kumar, N., Subha Rajam, K., & Esther Rani, M. (2017). Plant growth promotion efficacy of indole acetic acid (IAA) produced by a mangrove associated fungi — *Trichoderma viride* VKF3. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, *6*(11), 2692–2701. https://doi.org/10.20546/ijcmas.2017.611.317
47. Sari, M., Nawangsih, A. A., & Wahyudi, A. T. (2021). Rhizosphere *Streptomyces* formulas as the biological control agent of phytopathogenic fungi *Fusarium oxysporum* and plant growth promoter of soybean. *Biodiversitas*, *22*(6), 3015–3023. https://doi.org/10.13057/biodiv/d220602. EDN: https://elibrary.ru/ZXAYPO
48. Devi, V. V., Rani, K. C. M. E., Asaph, R. S., Suresh, P., Gomathinayagam, S., & Shanmugaiah, V. (2024). Prevalent plant growth hormone indole-3-acetic acid produced by *Streptomyces* sp. VSMKU1027 and its potential antifungal activity against phytofungal pathogens. *Journal of Pure and Applied Microbiology*, *18*(4), 2721–2733. https://doi.org/10.22207/JPAM.18.4.45. EDN: https://elibrary.ru/KYMBID
49. Nafady, N. A., et al. (2022). Effective and promising strategy in management of tomato root-knot nematodes by *Trichoderma harzianum* and arbuscular mycorrhizae. *Agronomy*, *12*(2). https://doi.org/10.3390/agronomy12020315. EDN: https://elibrary.ru/SUSSGN

50. Dhayal, R., et al. (2023). In vitro evaluation of bio-agents on hatching and mortality of root-knot nematode, *Meloidogyne javanica*. *Biological Forum — An International Journal*, *15*(8), 357.
51. Pontes, K. B., et al. (2024). Efficacy of microbiological nematicides in controlling root-knot nematodes in tomato. *Frontiers in Agronomy*, *6*. https://doi.org/10.3389/fagro.2024.1462323. EDN: https://elibrary.ru/JLEPOM

DATA ABOUT THE AUTHORS

Penta Suryaminarsih, Associate Professor, Plant Pest and Disease, Department Agrotechnology, Dr. of Phytopathology
Universitas Pembangunan Nasional Veteran Jawa Timur
Jl. Rungkut Madya No. 1, Surabaya, Indonesia
penta_s@upnjatim.ac.id

Safira Rizka Lestari, Assistant Professor, Plant Pest and Disease, Department Agrotechnology, Dr. Candidate of Phytopathology
Universitas Pembangunan Nasional Veteran Jawa Timur
Jl. Rungkut Madya No. 1, Surabaya, Indonesia
safira.rizka.agro@upnjatim.ac.id

Поступила 24.09.2024 Received 24.09.2024
После рецензирования 16.01.2025 Revised 16.01.2025
Принята 13.02.2025 Accepted 13.02.2025

АГРОХИМИЯ И АГРОПОЧВОВЕДЕНИЕ

AGROCHEMISTRY AND AGRICULTURAL SOIL SCIENCE

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-4-1210 **EDN: GXURZQ**
УДК 631.589:631.172

Научная статья

ВЛИЯНИЕ СПЕКТРА СВЕТА НА РОСТ *LACTUCA SATIVA* В КОНТРОЛИРУЕМЫХ УСЛОВИЯХ: НОВЫЕ ПОДХОДЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ДЛЯ ГИДРОПОННЫХ СИСТЕМ

С.В. Абрамова, Е.Н. Бояров, Н.Ф. Двойнова, О.В. Купцова

Аннотация

Обоснование. В условиях современных вызовов по обеспечению продовольственной безопасности и устойчивого развития агротехнологий в Российской Федерации особое внимание уделяется оптимизации методов выращивания растений в контролируемых средах. Одним из перспективных методов выращивания растений является использование закрытых гидропонных систем, в которых световой спектр играет ключевую роль для регуляции ростовых процессов и фотосинтеза. Данная статья посвящена исследованию влияния различных спектров света (синие, красные и смешанные) на рост растения *Lactuca sativa* в контролируемых условиях гидропоники. В работе представлены результаты сравнительного анализа скорости роста, биомассы и качества растений, а

Цель. Изучение влияния различных спектров света (синего, красного и смешанного) на рост и продуктивность салатных культур (*Lactuca sativa*) в условиях гидропоники для определения оптимальных световых условий, обеспечивающих максимальную урожайность и качество продукции.

Материалы и методы: Эксперимент проводился в лаборатории экспериментального гидропонного выращивания с использованием автоматизированной установки. В исследовании применялись LED-лампы с заданными спектральными характеристиками, которые объединялись с группы для создания различных

световых условий. Основные параметры, такие как длина стебля, количество листьев, биомасса растений и содержание хлорофилла, измерялись при использовании монохроматического синего, красного света и их комбинации.

Результаты: Исследование показало, что синий свет (450 нм) увеличивает содержание хлорофилла и фотосинтетическую активность, способствуя компактному росту растений с большим количеством листьев, но снижает общую биомассу. Красный свет (660 нм, 740 нм), напротив, стимулирует увеличение длины стебля и биомассы, но снижает содержание хлорофилла. Комбинированный свет (красный и синий спектры) продемонстрировал сбалансированные результаты, обеспечивая оптимальные условия для роста, высокой фотосинтетической активности и качественной биомассы растений.

Заключение. Применение комбинированного спектра света в гидропонных установках позволяет достичь максимальных показателей продуктивности и качества продукции салатных культур. Полученные результаты подчеркивают необходимость дальнейшей оптимизации световых условий для достижения эффективного роста *Lactuca sativa* в условиях гидропоники и подтверждают перспективность закрытых гидропонных систем для устойчивого производства продовольственных культур.

Ключевые слова: гидропоника; спектр света; фотосинтез; Lactuca sativa; LED-фитотампа; управляемая среда

Для цитирования. Абрамова, С. В., Бояров, Е. Н., Двойнова, Н. Ф., & Купцова, О. В. (2025). Влияние спектра света на рост *Lactuca sativa* в контролируемых условиях: новые подходы и перспективы для гидропонных систем. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(4), 269-295. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-4-1210

Original article

THE EFFECT OF THE LIGHT SPECTRUM ON THE GROWTH OF *LACTUCA SATIVA* UNDER CONTROLLED CONDITIONS: NEW APPROACHES AND PROSPECTS FOR HYDROPONIC SYSTEMS

S.V. Abramova, E.N. Boyarov, N.F. Dvoinova, O.V. Kuptsova

Abstract

Background. In the context of modern challenges for ensuring food security and sustainable development of agrotechnologies in the Russian Federation, par-

ticular attention is being paid to optimizing plant cultivation methods in controlled environments. One of the promising methods is the use of closed hydroponic systems, where the light spectrum plays a key role in regulating growth processes and photosynthesis. This article focuses on studying the effects of different light spectra (blue, red, and mixed) on the growth of *Lactuca sativa* under controlled hydroponic conditions. The study presents the results of a comparative analysis of growth rates, biomass, and plant quality.

Purpose. To examine the influence of different light spectra (blue, red, and mixed) on the growth and productivity of lettuce (*Lactuca sativa*) in hydroponic conditions, to determine the optimal lighting conditions for maximizing yield and quality.

Materials and Methods. The study found that blue light (450 nm) increases chlorophyll content and photosynthetic activity, promoting compact plant growth with a high leaf count but reducing total biomass. Red light (660 nm, 740 nm), on the other hand, stimulates stem elongation and biomass accumulation but decreases chlorophyll content. Combined lighting (red and blue spectra) provided balanced results, ensuring optimal conditions for growth, high photosynthetic activity, and high-quality plant biomass.

Results. It has been shown that the use of UAVs in agriculture in the Sakhalin region offers broad opportunities for monitoring agricultural indicators, enabling the creation of a compact and flexible data collection system through the connection and integration of various sensors, thus facilitating the development of a scalable system. A model for the application of UAVs in the ecological monitoring of agricultural lands in the Sakhalin region has been developed, featuring an original interface for real-time sensor data processing and storage in a specialized database. To implement the model, a methodology for utilizing UAVs to assess the quality state of agricultural lands in the Sakhalin region was developed and tested.

Conclusions. The use of combined light spectra in hydroponic systems allows for achieving maximum productivity and quality in lettuce cultivation. The results underscore the need for further optimization of lighting conditions to promote efficient *Lactuca sativa* growth under hydroponic conditions and confirm the potential of closed hydroponic systems for sustainable food crop production.

Keywords: hydroponics; light spectrum; photosynthesis; Lactuca sativa; LED grow light; controlled environment

For citation. Abramova, S. V., Boyarov, E. N., Dvoinova, N. F., & Kuptsova, O. V. (2025). The impact of light spectrum on *Lactuca sativa* growth in controlled conditions: New approaches and prospects for hydroponic systems. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(4), 269-295. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-4-1210

Введение

В условиях усиленного импортозамещения продукции сельского хозяйства в России, климатических особенностей рискованного земледелия в ряде ее регионов приобретают актуальность методы выращивания салатных культур в гидропонных системах, обеспечивающих население свежей, качественной и безопасной продукцией. Не мало важным для сельхозпроизводителей остается вопрос снижения энергоемкости применяемых технологий выращивания продукции. Внедрение в технологию контроля световой среды позволяет при получении высококачественного урожая снизить затраты на электричество до 40 %, закупку пестицидов до 40 %, экономия воды достигает 30 %, а срок выращивания продукции сокращается на 20 %.

Вместе с тем, в XXI веке возникают проблемы с устойчивостью сельскохозяйственной деятельности, в том числе, из-за роста затрат на энергию, рабочую силу и материалы [4]. Выращивание растений в условиях закрытого грунта применяется уже довольно давно, но, как отмечают ученые, несмотря на то, что такой способ может значительно повысить эффективность использования ресурсов (поверхности, воды и питательных веществ) по сравнению с традиционными системами выращивания, но затраты на освещение по-прежнему высоки [19].

Гидропоника, как метод выращивания растений, представляет собой систему культивации без почвы, где корни растений находятся в постоянном контакте с питательным раствором. Одним из основных преимуществ этой технологии является возможность полного контроля над внешними факторами, включая свет, температуру, влажность и концентрацию углекислого газа. Среди всех этих факторов именно свет оказывает наиболее существенное влияние на физиологические процессы растений, такие как фотосинтез, транспирация и метаболизм.

Фотосинтетически активная радиация (PAR) включает длины волн от 400 до 700 нм, и каждая из них по-разному влияет на процессы роста растений. Синий свет (450-470 нм) традиционно ассоциируется с увеличением содержания хлорофилла и ускорением фотосинтетических процессов, что приводит к компактному росту растений. Красный свет (620-660 нм) стимулирует удлинение стебля и образование листьев, что способствует увеличению общей биомассы растений [2].

Исследования по влиянию спектра света на рост салата в гидропонных системах демонстрируют значительное воздействие светодиодных технологий на ростовые характеристики, биохимический состав и качество про-

дукции. Вопрос оптимизации световых условий остаётся центральным для достижения высокой урожайности и качества салата (*Lactuca sativa*).

Интенсивность и качество освещения являются одними из наиболее важных факторов окружающей среды для физиологии и биохимии сельскохозяйственных культур [22]. Интенсивность света контролирует основные процессы в растениях, включая прорастание, разрастание листьев, фотосинтез, зарождение почек и цветков, а также деление клеток. При этом, оптимальная интенсивность света способствует быстрому ускорению процессов в растениях [6]. Кроме того, замечено, что ультрафиолетовое излучение (UV-B) вызывает защитную реакцию у растений и может снизить восприимчивость к болезням [15].

Современные зарубежные исследования (в основном, проведенные китайскими учеными) показывают, что наиболее эффективное сочетание спектров света для выращивания салата – это комбинация красного и синего света. Это связано с тем, что красный свет (620–660 нм) стимулирует удлинение стебля и активизирует деление клеток, что способствует увеличению биомассы растения. Синий свет (450–470 нм), напротив, повышает содержание хлорофилла и фотосинтетическую активность, что улучшает качество листьев. Также было показано, что координация гидравлической проводимости и активности устьиц под воздействием различных световых качеств способствовала улучшению фотосинтеза у огурцов, что может быть аналогично и для салата [10]. Другие исследования показали, что комбинированное использование красного и синего спектра не только увеличивает фотосинтетическую активность, но и приводит к улучшению морфологии салата, особенно в условиях закрытых систем выращивания [11]. Исследования воздействия комбинации спектров показывают, что использование светодиодных ламп для освещения салата в теплицах и других закрытых системах способствует улучшению качества продукции, что также поддерживается рядом других экспериментов [18]. Однако добавление зелёного света в спектр, может улучшить общее освещение и сделать возможным проникновение света в нижние слои листьев, что, в свою очередь, улучшает рост и качество биомассы салата [23]. Это подтверждается также результатами исследований [10], которые показали, что баланс между красным, синим и зелёным светом способствует накоплению полезных веществ, таких как фенолы и растворимые сахара, в листьях салата.

Российские исследователи также активно работают в области оптимизации светодиодного освещения для гидропонных систем. Так, в исследованиях [1] было показано, что оптимизация спектра света позволяет

увеличить урожайность и улучшить качество листовой массы салата в условиях контролируемой среды. Ученые отметили, что использование красно-синего спектра приводит к увеличению фотосинтетической активности, особенно на поздних стадиях роста растений [1]. Кроме того, интересным является исследование [3], в котором было обнаружено, что синий свет влияет на активность устьиц, что позволяет улучшить транспирацию и увеличить количество листьев, что подтверждает общие выводы о важности синего спектра для роста салата.

Изучение обмена веществ у растений также показало, что различные световые спектры могут существенно влиять на азотный обмен. Исследования [14], показали, что красный свет увеличивает активность нитратредуктазы, что способствует лучшему усвоению азота и снижению накопления нитратов в листьях. Это особенно важно для обеспечения экологичности продукции, так как высокие уровни нитратов могут быть вредны для здоровья.

Сложность управления спектром света и его влияния на разные сорта салата также отмечена в исследовании [13], где авторы обнаружили, что красные сорта лучше реагируют на белый свет, тогда как зеленые сорта лучше развиваются при красно-синем освещении. Похожие исследования были проведены в 2018 году, где группа ученых были сосредоточены на изучении эффектов различных соотношений красного и синего света при фотопериоде от 12 до 18 часов на рост и химический состав салата сорта «Fire Red». Было установлено, что растения, освещаемые синим светом, достигли наибольшей высоты, но при этом имели наименьшее количество листьев. Комбинация красного и синего света оказалась оптимальной для повышения содержания антоцианов и свежей массы растений, что особенно важно для коммерческой привлекательности сорта [16]. Кроме того, в 2024 году отдельными научными коллективами изучено воздействие различных сочетаний синего и янтарного света на продуктивность томатов и салата. Наибольшая биомасса была получена при обработке с комбинацией «royal blue + broad amber». При переходе от синего света 430 нм к 455 нм наблюдалось значительное снижение свежей массы томатов и небольшое снижение биомассы салата, что подтверждает необходимость точного подбора длин волн для оптимизации роста в зависимости от вида растения [21]. Вместе с тем, в работе [8] исследовали влияние светодиодного освещения с использованием технологии «Internet of Thingth» (IoT) для контроля условий среды на морфологические параметры салата. При добавлении жёлтого спектра был выявлен рост высоты растений, что говорит о возможности адаптации световых спектров для управления

морфологией в условиях закрытого выращивания. Использование IoT позволяет более точно отслеживать влияние светового спектра в реальном времени. Также, пир оценке влияния спектра света на физиологические параметры и антиоксидантную активность салата при гидропонном выращивании показали следующие результаты: сочетание синего (435 нм) и красного света (663 нм) на высокой интенсивности света увеличивало скорость фотосинтеза и урожай, тогда как более низкая интенсивность повышала антиоксидантную активность. Эти результаты подчеркивают, что интенсивность и соотношение света могут управлять как продуктивностью, так и биохимическими характеристиками растения [9]. Изучение влияния различных спектров LED-света на прорастание и рост рассады салата в условиях низкой интенсивности показали, что синий свет ускоряет прорастание и увеличивает количество всходов, особенно у зелёных сортов, а также улучшает морфологию рассады. После пересадки рассада, выращенная под синим и смешанным светом, демонстрировала лучшую производительность, что указывает на долгосрочные эффекты оптимизации спектра света [7]. Изучение влияния температуры и спектра света на рост, морфологию и содержание минералов у салата и капусты Пак-чой показывает, что повышение температуры приводило к увеличению биомассы и размера листьев, но снижало минеральное содержание, в то время как спектр света имел менее выраженное влияние. Эти данные свидетельствуют о важности учета температуры наряду с подбором спектра света для регулирования качества продукции [12].

Анализ роста и урожайности салата сорта «Fire Red» под влиянием монохромного красного и синего света в условиях контролируемой среды показывают, что красный свет оказался менее эффективным для роста растений, тогда как синий свет способствовал наибольшей высоте и свежей массе. Комбинированное освещение в соотношении «красный:синий» 2:1 или 1:2 обеспечивало более компактное строение растения и увеличивало насыщенность красного пигмента, что имеет значение для товарной привлекательности [17].

Интерес представляет и исследования, в которых сравниваются три источника искусственного света – флуоресцентная лампа и два типа светодиодов – в условиях закрытых систем выращивания. Так, светодиодная (LED) лампа приводила к меньшей длине междоузлий и большей длине корней у салата, что свидетельствует о возможности использования такого освещения для контроля структуры растений. Флуоресцентное освещение также способствовало более высокому содержанию калия, кальция и магния в растениях, что может быть полезно для контроля их питательной ценности [5].

Несмотря на уже проведенные исследования, вопрос о комбинированном использовании различных спектров для достижения максимальных морфометрических показателей и формирования адаптационных реакций, выращиваемых растений остается недостаточно изученным.

Целью данной работы является исследование влияния синих, красных и смешанных световых спектров на рост салата в гидропонных системах, а также определение оптимальных световых условий для максимальной урожайности.

Материалы и методы

Исследование проводилось в лаборатории экспериментального гидропонного выращивания растений совместно с научно-исследовательской лабораторией прикладной экологии на базе ФГБОУ ВО СахГУ с использованием автоматизированной закрытой гидропонной установки для проведения практических научных исследований в области экологического растениеводства (производство CEM Corporation, Honkomagome, Bunkyo-ku, Tokyo, Japan). Установка трёхъярусная – 3 культивационных водных бака с посевными досками и освещением, наружным размером 1830 (W) x620(D)x1800(H) (рис. 1). Данная установка обеспечивает автоматический контроль освещения, концентрации удобрений, температуры, уровня, pH воды, влажности воздуха.



Рис. 1. Гидропонная установка «Cemco»

В работе использовали витаминный листовой салат (*Lactuca sativa*) изготовителя ООО «Агрофирма Аэлита», Россия. Гидропонный органический питательный раствор изготовлен на основе минерального удобрения Plagron Hydro, с компонентами A+B, содержащий все необходимое рассаде в легкодоступной форме. Состав компонента A: NPK (5-0-2) – 5% общего азота (N), из которых 5% нитратного азота (N_3); 2% водорастворимого оксида калия (K_2O). Компонент B: NPK (2-5-9) – 2% общего азота (N), из которых 1,9% азота нитратов (NO_3); 4% водорастворимый фосфорный ангидрид (P_2O_5); 9% водорастворимый оксид калия (K_2O). Субстрат – гидропонный поролон, установленный в посевные пенопластовые доски общим количеством 416 отверстий.

Уровень освещенности контролировали интегральным измерителем освещенности и фотопериода со встроенным датчиком, памятью и дисплеем, модель DLI-600, Apogee. Уровень хлорофилла в листьях *Lactuca sativa* измеряли портативным прибором atLEAF CHL PLUS, FT Green LLC, предназначенным для неинвазивного измерения относительного уровня содержания хлорофилла в листьях растений.



Рис. 2. Корнеобразование исследуемого растения *Lactuca sativa*

В качестве специализированных источников искусственного освещения были выбраны светодиодные фитолампы (LED) с возможностью плавной регулировки яркости со следующими длинами волн: 450 нм (синий свет), 660 нм и740 нм (красный свет).

Сушильный шкаф WKS-1 использовали для измерения биомассы исследуемых растений под воздействием принудительной циркуляции воздуха. Растения высушивались до постоянной массы при температуре 60°C в течение 72 часов для точного измерения сухой биомассы. Для измерения

длины стебля применяли цифровой штангенциркуль, измерения биомассы – электронные лабораторные весы Digital scale Professiona.

Для проведения эксперимента были созданы стандартные условия контролируемой среды, которые имитируют оптимальные параметры для выращивания *Lactuca sativa* в гидропонных установках. Система гидропоники обеспечивала постоянное поступление питательных веществ к корням растений, а также поддерживали стабильный микроклимат на протяжении всего эксперимента (рис. 2).

1. Условия эксперимента

Эксперимент проводился в закрытой гидропонной установке с полным контролем над основными параметрами окружающей среды:

1) температура воздуха поддерживалась на уровне 21°C в дневное время и 18°C в ночное время, что соответствует оптимальной температуре для роста *Lactuca sativa*;

2) относительная влажность воздуха была стабильно на уровне 70 – 75 %, что предотвращало чрезмерную транспирацию и обеспечивало оптимальные условия для фотосинтеза;

3) световой режим был установлен на 16 часов света и 8 часов темноты, имитируя стандартный дневной цикл, который благоприятен для фотосинтеза и роста *Lactuca sativa*;

4) концентрация углекислого газа (CO) поддерживалась на уровне 400 ppm, что является стандартной концентрацией для фотосинтетической активности растений;

5) гидропонная установка использовала рециркуляцию питательного раствора, что позволило поддерживать постоянную концентрацию питательных веществ.

Общая продолжительность эксперимента составила 38 дней. Из лотков для исследования было отобрано по 30 растений *Lactuca sativa.*

2. Экспериментальные группы

Для изучения влияния светового спектра на рост *Lactuca sativa* растения были разделены на следующие группы – три экспериментальные и одна контрольная в зависимости от типа применяемого освещения. Все растения были одинакового возраста на момент начала эксперимента и высаживались в идентичные гидропонные ячейки. Далее растения подвергались экспериментальному воздействию:

группа 1: B-S (синий свет) - в этой группе растения подвергались воздействию монохроматического синего света с длиной волны 450-470 нм.

Этот спектр света известен своей способностью стимулировать фотосинтез, но при этом замедлять вертикальный рост растения. Вся световая нагрузка в этой группе поддерживалась на уровне 20 мкмоль/м²/с;

группа 2: R-S (красный свет) - растения в этой группе освещались монохроматическим красным светом с длиной волны 620–660 нм. Красный свет оказывает стимулирующее воздействие на клеточное деление и рост стебля, что предположительно приводит к удлинению растений. Световой поток также поддерживался на уровне 20 мкмоль/м²/с;

группа 3: B+R_S (комбинация синего и красного света) - в этой группе растения освещались смесью синего и красного света в соотношении 1:1. Длина волны синего света составляла 450–470 нм, а красного – 620–660 нм. Это сочетание спектров позволяет одновременно стимулировать как фотосинтез, так и рост растения. Интенсивность освещения также составляла 20 мкмоль/м²/с;

группа 4: KG - данная группа растений являлась контрольной и находилась под воздействием белого спектра света в диапазоне длин волн от 400 до 700 нм с интенсивностью светового потока 20 мкмоль/м²/с. Белый спектр позволяет имитировать дневной свет и сбалансировать рост, развитие растений.

3. Контрольные параметры и измерения

Для оценки влияния различных спектров света на рост *Lactuca sativa* были выбраны следующие параметры, которые измерялись на разных стадиях эксперимента (1, 2, 3 и 4 недели после посадки):

1) длина стебля: измерение длины стебля осуществлялось с использованием цифрового штангенциркуля с точностью до 0,1 мм. Это позволило отслеживать динамику роста растений в каждой из групп;

2) количество листьев: листья растений подсчитывались еженедельно, что позволяло определить влияние светового спектра на процесс листообразования;

3) общая биомасса: в конце эксперимента растения каждой группы были извлечены из гидропонной установки и взвешены. Оценивалась как общая сырая и сухая биомасса растений, а также отдельно листовой и корневой части растения;

4) содержание хлорофилла: для оценки фотосинтетической активности было измерено содержание хлорофилла в листьях каждого растения на длине волны 663 нм для хлорофилла «a» и 645 нм для хлорофилла «b». Измерения проводились каждые две недели;

5) измерение скорости фотосинтетической активности позволило регистрировать изменения интенсивности фотосинтеза в зависимости от спектра света.

4. Статистический анализ

Все данные, полученные в ходе эксперимента, подверглись статистической обработке. Для оценки значимости различий между экспериментальными группами использовался дисперсионный анализ (ANOVA). В случаях выявления статистически значимых различий между группами использовался тест Тьюки для выявления парных различий. Статистически значимым считалось значение уровня $p < 0,05$.

5. Ограничения исследования

Основным ограничением данного исследования является использование только двух монохроматических спектров (синего, красного и их комбинации). Другие спектры света, такие как зеленый и желтый, также могут оказывать значительное влияние на рост растений и требуют дальнейшего изучения. Также эксперимент проводился в условиях лаборатории, что ограничивает возможность его полной экстраполяции на промышленные масштабы.

Результаты

Результаты проведённого эксперимента продемонстрировали значительное влияние различных спектров света (синий, красный и их комбинация) на морфометрические показатели выращивания *Lactuca sativa* в условиях гидропонной системы. Были проанализированы пять ключевых параметров: длина стебля, количество листьев, биомасса растений, содержание хлорофилла и фотосинтетическая активность.

1. Длина стебля

Длина стебля является важным показателем морфологии растений, так как она отражает активность клеточного деления и растяжения клеток, которые находятся под влиянием освещения:

группа 1 (B-S): растения, подвергшиеся воздействию синего света, показали наименьшую длину стебля по сравнению с другими группами. Средняя длина стебля составила 8,5 см через 30 дней эксперимента. Это связано с тем, что синий свет стимулирует компактный и более «кустистый» рост растения за счет увеличения фотосинтетической активности и синтеза хлорофилла, но при этом тормозит удлинение стеблей. Эти растения были более приземистыми, с плотно расположенными листьями;

группа 2 (R-S): в этой группе наблюдалось значительное увеличение длины стебля. Средняя длина стебля составила 15,2 см, что почти вдвое больше, чем в группе с синим светом. Красный свет, благодаря его влиянию на гормональные процессы, такие как синтез ауксинов, стимулиро-

вал удлинение клеток, что привело к более вытянутым и высокорослым растениям;

группа 3 (B+R_S): растения, освещаемые комбинированным спектром, показали средние результаты – длина стебля составила 11,8 см. Этот показатель был промежуточным между результатами, полученными в группах с монохроматическими спектрами. Это указывает на сбалансированное влияние смешанного света на рост растений, при котором сохраняется умеренный рост стебля без его чрезмерного удлинения;

группа 4 (KG): длина стебля растения контрольной группы составила в среднем 10.89 см, что ниже длины групп R-S и B+R_S, но выше, чем у растения B-S. Данные результаты подтверждают, что применение монохромного света влияет значительно влияет на формирование длины стебля исследуемого растения.

2. Количество листьев

Количество листьев является показателем уровня активности роста растений и важным параметром для оценки их продуктивности:

группа 1 (B-S): Среднее количество листьев на растение в этой группе составило 9, что является наибольшим показателем среди всех групп. Это связано с тем, что синий свет стимулирует формирование и развитие листьев, способствуя их плотному и равномерному расположению. Эти растения характеризовались более высоким уровнем фотосинтеза за счёт большего количества листьев и более активного синтеза хлорофилла;

группа 2 (R-S): Количество листьев в группе с красным светом было меньше и составило в среднем 7 на одно растение. Это связано с тем, что красный свет больше фокусируется на стимулировании роста стебля, чем на активном развитии листьев. Хотя растения и демонстрировали высокий уровень роста в длину, листьев на них было меньше;

группа 3 (B+R_S): Растения в этой группе показали средние результаты – в среднем 8 листьев на одно растение. Это указывает на более сбалансированное развитие растений, когда смешанный свет обеспечивает оптимальные условия как для роста стебля, так и для листообразования;

группа 4 (KG): количество листьев в розетке растений контрольной группы также достигло 8 листьев, подтверждая положительное влияние белого света на оптимальную урожайность листьев.

3. Биомасса

Общая биомасса растений является интегральным показателем их роста и развития, включающим как надземную часть, так и корневую систему:

группа 1 (B-S): растения в группе с синим светом продемонстрировали самую низкую сырую (95.8 г) и сухую (3.81 г) биомассу на одно растение. Сырая биомасса листовой части растения составила в среднем 46.12 г, что составило 48.14% от общей сырой биомассы. Сырая биомасса корневой части – 49.68 г. Таким образом, синий свет способствуя увеличению содержания хлорофилла и фотосинтетической активности, приводит к уменьшению общей сырой и сухой биомассы из-за замедленного роста стебля и листьев, при этом корневая система при данных условиях развивалась значительнее;

группа 2 (R-S): красный свет способствовал наибольшей сырой биомассе – в среднем 120.40 г и сухой биомассе – 4.45 г на одно растение. Соотношение листьев к общей сырой массе составило 65.48%, при этом значительно сократилась сырая биомасса корневой части. Это объясняется значительным удлинением стебля и более активным ростом тканей, что привело к увеличению массы растений. Однако качество биомассы (по содержанию хлорофилла) было ниже, чем в других группах;

группа 3 (B+R_S): биомасса растений в этой группе составила в среднем 110.10 г на растение. Хотя она была ниже, чем в группе с красным светом, в смешанной группе наблюдалось лучшее качество биомассы, что отражалось на балансе между ростом стебля и количеством листьев. Сырая биомасса листовой части составила 71.14 г – 64.61% от общей сырой биомассы, сухая биомасса – 4.12 г;

группа 4 (KG): исследование контрольной группы растений показало, что белый спектр по сравнению с синим, положительно влияет формирование как сырой общей (67.45 г), так и сухой (3.94 г) биомассы, но влияние сочетания красного с синим света и отдельно красного способствует более глубокому проникновению в листья и формированию большей биомассы. Отмечается в данном спектре высокое соотношение листовой части по отношению к корневой – 61.48%.

4. Содержание хлорофилла

Содержание хлорофилла в листьях является важным показателем фотосинтетической активности растений. Для измерений использовался спектрофотометр, и данные приведены в виде коэффициента содержания хлорофилла на единицу площади листа:

группа 1 (B-S): Растения, освещаемые синим светом, продемонстрировали наибольшее содержание хлорофилла. Средний коэффициент содержания хлорофилла составил 2,1 мг/см². Этот результат связан с тем, что синий свет напрямую стимулирует синтез хлорофилла, необходимого для фотосинтеза;

группа 2 (R-S): В этой группе содержание хлорофилла было самым низким – 1,3 мг/см². Это объясняется тем, что красный свет больше способствует развитию биомассы и удлинению стебля, чем интенсивному фотосинтезу;

группа 3 (B+R_S): Содержание хлорофилла в этой группе было промежуточным и составило 1,8 мг/см², что свидетельствует о том, что комбинированное освещение обеспечивает хороший баланс между фотосинтетической активностью и ростом биомассы;

группа 4 (KG): белый свет в контрольной группе растений стимулирует образование хлорофилла в меньшем количестве (1.68 мг/см²) по сравнению с синим светом (2.10 мг/см²) и его комбинацией с красным (1.8 мг/см²), подтверждая, что хлорофилл наиболее интенсивно поглощает синее излучение.

5. Фотосинтетическая активность

Фотосинтетическая активность – это один из диагностических признаков физиологического состояния растений, от которого зависит их продуктивность и качество урожая. Изменение освещенности растений приводит к изменению их фотосинтетического аппарата, влияющего на поглощение световой энергии листом и поступление в клетки углекислого газа:

группа 1 (B-S): исследование показало, что фотосинтетическая активность в листьях листового салата под синим светом выше, чем в контрольной группе под белым и составила соответственно – 11.90/10.31 CO_2/м²с. При синем свете происходит полное поглощение хлорофилла и создаются условия для максимальной интенсивности фотосинтеза;

группа 2 (R-S): фотосинтетическая активность при красном свете составила 11.15 CO_2/м²с, что выше, чем в контрольной группе – 9.31 CO_2/м²с. Содержащиеся в листьях хлорофиллы и каротиноиды способны хорошо поглощать красный свет, увеличивая при этом фотосинтез листьев и проводимость устьиц;

группа 3 (B+R_S): влияние сочетания красного и синего света на фотосинтетическую активность растения составило 10.17 CO_2/м²с, выше, чем в контрольной группе;

группа 4 (KG): фотосинтетическая активность растений в контрольной группе была самой низкой – 9.31 CO_2/м²с, подтверждая, что большая часть фотосинтетической активности у растений происходит в синем и красном свете, а также в их сочетании.

Обобщенные результаты эксперимента представлены в таблице 1, которая содержит данные по каждому из изучаемых параметров.

Таблица 1.

Морфометрические показатели выращивания *Lactuca sativa* при различных спектрах света

Показатель	B-S	R-S	B+R_S	KG
Длина стебля, см	8,50±0,33	15,20±0,21	11,80±0,34	10,89±0,38
Количество листьев, шт.	9,18±0,57	7,24±0,24	8,36±0,26	8,45±0,19
Сырая общая биомасса, г	95,80±3,75	120,40±4,23	110,10±4,58	109,19±3,61
Сырая биомасса листовой части растения, г	46,12±1,25	78,84±2,45	71,14±2,51	67,45±4,23
Сырая биомасса корневой части растения, г	49,68±3,58	41,56±5,10	38,96±3,34	41,74±4,25
Сухая общая биомасса, г	3,81±0,21	4,45±0,33	4,12±0,27	3,94±0,56
Соотношение листьев к общей сырой массе растения, %	48,14±1,45	65,48±2,62	64,61±3,28	61,48±4,15
Содержание хлорофилла, мг/см²	2,10±0,15	1,30±0,11	1,80±0,16	1,68±0,10
Фотосинтетическая активность, мкмоль CO_2/м²с	11,90±0,18	11,15±1,10	10,17±0,89	9,31±1,17

Таким образом, полученные результаты продемонстрировали, что синий свет оказывает наибольшее влияние на фотосинтетическую активность растений и стимулирует их компактный рост с большим количеством листьев, однако приводит к снижению общей биомассы. Красный свет, напротив, стимулирует рост стебля и наибольшую биомассу, но снижает содержание хлорофилла и количество листьев.

B+R_S света продемонстрировал наиболее сбалансированные результаты, обеспечивая как умеренный рост стебля, так и высокую фотосинтетическую активность, что делает его оптимальным вариантом для выращивания *Lactuca sativa* в условиях гидропонных систем.

Обсуждение

Результаты данного исследования демонстрируют важность выбора оптимального спектра света для повышения продуктивности *Lactuca sativa* в условиях гидропоники. Полученные данные позволили оценить влияние синего, красного и комбинированного спектров на ключевые морфологические и физиологические параметры растений, такие как длина стебля, количество листьев, общая биомасса и содержание хлорофилла. Важные различия в показателях роста подтверждают значимость влияния спектра света на разные процессы роста и развития растений.

1. Влияние B-S на рост *Lactuca sativa*

Синий свет (450 нм), применяемый в первой группе, оказал значительное влияние на формирование листьев и фотосинтетическую активность растений. Повышенное содержание хлорофилла (2,1 мг/см²) и наибольшее количество листьев (в среднем 9) на одно растение подтверждают, что синий свет стимулирует фотосинтетическую активность и способствует компактному росту растений. Это согласуется с предыдущими исследованиями, которые показали, что B-S влияет на увеличение содержания хлорофилла и улучшает морфологию листьев. Однако, следует отметить, что общая биомасса растений в этой группе была наименьшей (95.8 г на растение). Это может быть связано с тем, что B-S подавляет удлинение клеток, что ограничивает рост стебля и приводит к снижению биомассы. Таким образом, использование чисто синего спектра может быть целесообразным для культур, где важны компактность и листовая масса, но не общая масса растений.

2. Влияние R-S на рост *Lactuca sativa*

Красный свет (660 нм +740 нм), применяемый во второй группе, показал наибольшую эффективность в плане стимулирования общего роста растений. Длина стебля (в среднем 15,2 см) и общая биомасса (120.4 г на растение) были наибольшими среди всех групп, что подтверждает стимулирующее действие красного света на клеточное деление и растяжение клеток. Эти результаты согласуются с предыдущими исследованиями, которые показали, что R-S ускоряет процесс клеточного деления и способствует увеличению размеров растений.

Однако было выявлено, что R-S приводит к снижению фотосинтетической активности, о чём свидетельствует наименьшее содержание хлорофилла (1,3 мг/см²) среди всех групп. Этот факт указывает на то, что растения, хотя и имеют большую биомассу и длину стебля, могут не иметь достаточной фотосинтетической способности для поддержания длительного роста и качества листовой массы. Такие растения могут иметь более рыхлую структуру и меньшую устойчивость к неблагоприятным условиям выращивания, что может быть проблемой для длительного хранения или транспортировки продукции.

Таким образом, R-S света рекомендуется для стимулирования быстрого роста и увеличения биомассы, однако его недостаток в снижении содержания хлорофилла и плотности растений делает его менее подходящим для культур, где важны высокие фотосинтетические показатели и качество листовой массы.

3. Влияние B+R_S (синий и красный)

Комбинированный спектр света (1:1 синий и красный), применявшийся в третьей группе, показал наилучшие результаты по многим параметрам. Средние показатели длины стебля (11,8 см), количества листьев (8) и биомассы (110.1 г на растение) демонстрируют сбалансированное воздействие смешанного света на рост *Lactuca sativa*. В этой группе также наблюдалось повышенное содержание хлорофилла (1,8 мг/см²) по сравнению с группой, освещаемой чисто красным светом. Эти результаты подтверждают, что смешанный свет позволяет достичь баланса между стимулированием роста и поддержанием высокой фотосинтетической активности, что делает этот спектр оптимальным для выращивания *Lactuca sativa*.

Комбинация синего и красного света позволяет использовать преимущества каждого спектра: синий свет поддерживает активность фотосинтеза и улучшает качество листьев, а красный – стимулирует активный рост стебля и биомассы. Такие сбалансированные условия создают предпосылки для оптимального роста растений, что особенно важно для коммерческого производства в гидропонных системах. Эти результаты подтверждают необходимость применения смешанного спектра для обеспечения максимальной урожайности и качества продукции .

В контексте применения данных результатов для практического использования в гидропонных системах можно сделать следующие выводы:

Синий свет можно использовать для получения растений с плотной листовой массой и высоким содержанием хлорофилла. Это может быть полезно для специализированных культур, где важна компактность и качество зелени, например, для производства салатных смесей или декоративных растений.

Красный свет целесообразен для ускоренного производства биомассы и быстрого роста, что может быть полезно в системах, ориентированных на быстрый оборот продукции. Однако это может приводить к снижению качества продукции, что требует дополнительных корректировок светового режима на финальных стадиях выращивания.

Смешанный свет является наилучшим выбором для большинства коммерческих систем, поскольку он позволяет достичь баланса между скоростью роста, биомассой и качеством продукции. Использование смешанных спектров также снижает необходимость в частых корректировках световых условий и позволяет добиться стабильных урожаев с высокими показателями качества.

Ограничения исследования и направления для дальнейших исследований

Хотя результаты данного исследования дают ясное представление о влиянии различных спектров света на рост *Lactuca sativa*, необходимо учитывать несколько ограничений:

Исследование проводилось только на двух основных спектрах (синий и красный), однако другие части светового спектра, такие как зелёный и жёлтый свет, также могут оказывать влияние на рост растений. Будущие исследования могли бы включать изучение влияния полного спектра света или изменяющихся световых условий на разных стадиях роста растения.

Эксперимент проводился в лабораторных условиях с контролируемыми параметрами микроклимата. Хотя это позволяет точно отслеживать изменения параметров роста, условия реальных теплиц или открытых систем могут несколько отличаться. Необходимы дополнительные исследования, чтобы проверить результаты в более крупных масштабах.

В ходе исследования не учитывались параметры качества продукции, такие как содержание витаминов, минеральных веществ и антиоксидантов в листьях. Эти данные могли бы предоставить более полную картину влияния спектра света на питательную ценность продукции.

Таким образом, исследование подтвердило, что выбор спектра света является ключевым фактором для оптимизации роста *Lactuca sativa* в условиях гидропоники. Синий свет стимулирует фотосинтетическую активность и увеличивает количество листьев, но снижает общую биомассу. Красный свет, напротив, способствует активному росту стебля и увеличению биомассы, но снижает содержание хлорофилла. Наиболее сбалансированные результаты были получены в группе с комбинированным спектром света, что делает этот подход оптимальным для выращивания *Lactuca sativa* в коммерческих системах.

Заключение

Гидропонные системы, основанные на использовании светодиодных технологий с возможностью контроля спектра света, представляют собой перспективный инструмент для увеличения производительности и улучшения качества сельскохозяйственных культур. Результаты данного исследования показывают, что для выращивания *Lactuca sativa* в контролируемых условиях наиболее эффективно использовать смешанные световые спектры, что позволяет достичь наилучших результатов по биомассе и качеству растений.

В дальнейшем целесообразно продолжить исследования, направленные на изучение влияния других спектральных комбинаций света и динамических методов регулирования освещения, что позволит еще больше оптимизировать процесс роста растений в гидропонике.

Информация о спонсорстве. Работа финансировалась за счет средств гранта в форме субсидии «Приоритет-2030» в рамках проекта «Разработка природоподобной технологии выращивания растений с заданными свойствами в интеллектуальной гидропонной системе закрытого типа».

Список литературы

1. Мишанов, А. П., Маркова, А. Е., Ракутько, С. А. и др. (2015). Влияние соотношения долей зелёного и красного излучения на биометрические показатели салата. *Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства*, *87*, 264–272. EDN: https://elibrary.ru/VHGOPB
2. Наконечная, О. В., Михеева, А. В., Бурдуковский, М. Л., Орловская, И. Ю., Гафицкая, И. В., Хроленко, Ю. А., Бурковская, Е. В., Субботин, Е. П., Холин, А. С., Кульчин, Ю. Н. (2023). Влияние светодиодного освещения разного спектра на развитие салата листового (*Lactuca sativa*). *Известия Российской академии наук. Серия биологическая*, *3*, 278–286. https://doi.org/10.31857/S1026347022600406. EDN: https://elibrary.ru/MIAMYV
3. Чуб, В. В., Миронова, О. Ю. (2017). Влияние различных источников света на рост и развитие растений. В: *Роль ботанических садов и дендрариев в сохранении, изучении и устойчивом использовании разнообразия растительного мира*: Материалы Международной научной конференции, посвящённой 85-летию Центрального ботанического сада Национальной академии наук Беларуси (в 2 ч., Минск, Беларусь, 06–08 июня 2017 г.), ч. 2 (с. 148–151). Минск, Беларусь: Медисонт. EDN: https://elibrary.ru/ZBPBMP
4. Baghalian, K., Hajirezaei, M.-R., & Lawson, T. (2023). Editorial: Current and future perspectives for controlled environment agriculture (CEA) in the 21st century. *Frontiers in Plant Science*, *14*. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1334641. EDN: https://elibrary.ru/BWTYJV
5. Etae, N., Utaipan, T., Ruangrak, E., & Khummueng, W. (2024). Effect of artificial light sources on the growth of green oak lettuce (*Lactuca sativa* L.) grown in plant factories. *Journal of Applied and Natural Science*, *16*, 1376–1382. https://doi.org/10.31018/jans.v16i3.5513. EDN: https://elibrary.ru/AIFUKR
6. Feng, L., Raza, M. A., Li, Z., Chen, Y., Khalid, M. H. B., Du, J., Liu, W., Wu, X., Song, C., Yu, L., Zhang, Z., Yuan, S., Yang, W., & Yang, F. (2019). The influence of light intensity and leaf movement on photosynthesis characteristics and carbon balance of soybean. *Frontiers in Plant Science*, *9*:1952. https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01952

7. Hernández-Adasme, C., Silva, H., & Escalona, V. (2022). In-door germination and seedling growth of green and red lettuce under LED-light spectrum and subsequent effect on baby leaf lettuce. *Italian Journal of Agronomy*, *17*. https://doi.org/10.4081/ija.2022.1982
8. Imron, H., Putra, S., & Sofii, I. (2023). Effect of light spectrum LED lettuce on IoT-based indoor farming. *Biotropika: Journal of Tropical Biology*, *11*, 38–43. https://doi.org/10.21776/ub.biotropika.2023.011.01.05. EDN: https://elibrary.ru/WYGGLW
9. Jalal, S., Rihan, H., Aljafer, N., & Fuller, M. (2021). The impact of light spectrum and intensity on the growth, physiology, and antioxidant activity of lettuce (*Lactuca sativa* L.). *Plants*, *10*, 2162. https://doi.org/10.3390/plants10102162
10. Lee, J. G., Lee, B. Y., & Lee, H. J. (2006). Accumulation of phytotoxic organic acids in reused nutrient solution during hydroponic cultivation of lettuce (*Lactuca sativa* L.). *Scientia Horticulturae*, *110*(2), 119–128. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2006.06.013
11. Kang, S., Kim, J. E., Zhen, S., & Kim, J. (2022). Mild-intensity UV-A radiation applied over a long duration can improve the growth and phenolic contents of sweet basil. *Frontiers in Plant Science*, *13*:858433. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.858433. EDN: https://elibrary.ru/LYLYHV
12. Kong, Y., Masabni, J., & Niu, G. (2023). Temperature and light spectrum differently affect growth, morphology, and leaf mineral content of two indoor-grown leafy vegetables. *Horticulturae*, *9*, 331. https://doi.org/10.3390/horticulturae9030331. EDN: https://elibrary.ru/YNFPLZ
13. Laubinger, S., Marchal, V., Gourrierec, J., Gentilhomme, J., Wenkel, S., Adrian, J., Jang, S., Kulajta, C., Braun, H., Coupland, G., & Hoecker, U. (2006). Arabidopsis SPA proteins regulate photoperiodic flowering and interact with the floral inducer CONSTANS to regulate its stability. *Development (Cambridge, England)*, *133*, 3213–3222. https://doi.org/10.1242/dev.02481
14. Li, J., Wu, T., Huang, K., Liu, Y., Liu, M., & Wang, J. (2021). Effect of LED spectrum on the quality and nitrogen metabolism of lettuce under recycled hydroponics. *Frontiers in Plant Science*, *12*:678197. https://doi.org/10.3389/fpls.2021.678197. EDN: https://elibrary.ru/VLMTTM
15. McLay, E. R., Pontaroli, A. C., & Wargent, J. J. (2020). UV-B induced flavonoids contribute to reduced biotrophic disease susceptibility in lettuce seedlings. *Frontiers in Plant Science*, *11*:594681. https://doi.org/10.3389/fpls.2020.594681. EDN: https://elibrary.ru/RQULFU
16. Ngilah, E., Tsan, F., & Kar, Y. (2015). Growth and yield of organic *Lactuca sativa* cv. Fire Red under irradiation of light emitting diode in controlled environ-

ment. *International Journal of Agriculture, Forestry and Plantation*, *1*. https://ijafp.org/wp-content/uploads/2015/10/AG-52.pdf
17. Ngilah, E., Tsan, F., & Yap, B. (2008). Photoperiod and light spectrum effects on growth, pigment and ascorbic acid content of *Lactuca sativa* cv. Fire Red under controlled growth environment. *International Food Research Journal*, *25*(2), 1300–1308. http://www.ifrj.upm.edu.my/25 (03) 2018/(57).pdf
18. Olle, M., & Viršile, A. (2013). The effects of light-emitting diode lighting on greenhouse plant growth and quality. *Agricultural and Food Science*, *22*, 223–234. https://doi.org/10.23986/afsci.7897. EDN: https://elibrary.ru/RHHNTL
19. Pennisi, G., Blasioli, S., Cellini, A., Maia, L., Crepaldi, A., Braschi, I., Spinelli, F., Nicola, S., Fernandez, J. A., Stanghellini, C., Marcelis, L. F. M., Orsini, F., & Gianquinto, G. (2019). Unraveling the role of red:blue LED lights on resource use efficiency and nutritional properties of indoor grown sweet basil. *Frontiers in Plant Science*, *10*:305. https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00305
20. Savvides, A., Ali, S., Tester, M., & Fotopoulos, V. (2016). Chemical priming of plants against multiple abiotic stresses: Mission possible? *Trends in Plant Science*, *21*, 329–340. https://doi.org/10.1016/j.tplants.2015.11.003. EDN: https://elibrary.ru/XOYXGJ
21. Trumpler, K., Wu, B.-S., Addo, P. W., Macpherson, S., & Lefsrud, M. (2024). Plant growth optimization using amber light supplemented with different blue light spectra. *Horticulturae*, *10*(1097). https://doi.org/10.3390/horticulturae10101097. EDN: https://elibrary.ru/ZTANUB
22. Yang, L., Chen, L., Peng, H., Guo, P., Wang, P., Ma, C.-L., et al. (2012). Organic acid metabolism in *Citrus grandis* leaves and roots is differently affected by nitric oxide and aluminum interactions. *Scientia Horticulturae*, *133*, 40–46. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2011.10.011
23. Zhonghua, B., Ruifeng, C., Yu, W., Qichang, Y., & Chungui, L. (2018). Effect of green light on nitrate reduction and edible quality of hydroponically grown lettuce (*Lactuca sativa* L.) under short-term continuous light from red and blue light-emitting diodes. *Environmental and Experimental Botany*, *153*, 63–71. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2018.05.010

References

1. Mishanov, A. P., Markova, A. E., Rakutko, S. A., et al. (2015). Effect of the ratio of green and red light fractions on biometric parameters of lettuce. *Technologies and Technical Means of Mechanized Production of Crop and Livestock Products*, *87*, 264–272. EDN: https://elibrary.ru/VHGOPB
2. Nakonechnaya, O. V., Mikheeva, A. V., Burdukovsky, M. L., Orlovskaya, I. Yu., Gafitskaya, I. V., Khrolenko, Yu. A., Burkovskaya, E. V., Subbotin, E. P.,

Kholin, A. S., & Kulchin, Yu. N. (2023). Effect of LED lighting of different spectra on the development of leaf lettuce (*Lactuca sativa*). *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Biological Series*, *3*, 278–286. https://doi.org/10.31857/S1026347022600406. EDN: https://elibrary.ru/MIAMYV

3. Chub, V. V., & Mironova, O. Yu. (2017). Effect of different light sources on plant growth and development. In: *The role of botanical gardens and arboreta in conserving, studying, and sustainably using plant diversity: Proceedings of the International Scientific Conference dedicated to the 85th anniversary of the Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus* (in 2 parts, Minsk, Belarus, June 6–8, 2017), part 2 (pp. 148–151). Minsk, Belarus: Medisont. EDN: https://elibrary.ru/ZBPBMP
4. Baghalian, K., Hajirezaei, M.-R., & Lawson, T. (2023). Editorial: Current and future perspectives for controlled environment agriculture (CEA) in the 21st century. *Frontiers in Plant Science*, *14*. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1334641. EDN: https://elibrary.ru/BWTYJV
5. Etae, N., Utaipan, T., Ruangrak, E., & Khummueng, W. (2024). Effect of artificial light sources on the growth of green oak lettuce (*Lactuca sativa* L.) grown in plant factories. *Journal of Applied and Natural Science*, *16*, 1376–1382. https://doi.org/10.31018/jans.v16i3.5513. EDN: https://elibrary.ru/AIFUKR
6. Feng, L., Raza, M. A., Li, Z., Chen, Y., Khalid, M. H. B., Du, J., Liu, W., Wu, X., Song, C., Yu, L., Zhang, Z., Yuan, S., Yang, W., & Yang, F. (2019). The influence of light intensity and leaf movement on photosynthesis characteristics and carbon balance of soybean. *Frontiers in Plant Science*, *9*:1952. https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01952
7. Hernández-Adasme, C., Silva, H., & Escalona, V. (2022). In-door germination and seedling growth of green and red lettuce under LED-light spectrum and subsequent effect on baby leaf lettuce. *Italian Journal of Agronomy*, *17*. https://doi.org/10.4081/ija.2022.1982
8. Imron, H., Putra, S., & Sofii, I. (2023). Effect of light spectrum LED lettuce on IoT-based indoor farming. *Biotropika: Journal of Tropical Biology*, *11*, 38–43. https://doi.org/10.21776/ub.biotropika.2023.011.01.05. EDN: https://elibrary.ru/WYGGLW
9. Jalal, S., Rihan, H., Aljafer, N., & Fuller, M. (2021). The impact of light spectrum and intensity on the growth, physiology, and antioxidant activity of lettuce (*Lactuca sativa* L.). *Plants*, *10*, 2162. https://doi.org/10.3390/plants10102162
10. Lee, J. G., Lee, B. Y., & Lee, H. J. (2006). Accumulation of phytotoxic organic acids in reused nutrient solution during hydroponic cultivation of lettuce (*Lactuca sativa* L.). *Scientia Horticulturae*, *110*(2), 119–128. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2006.06.013

11. Kang, S., Kim, J. E., Zhen, S., & Kim, J. (2022). Mild-intensity UV-A radiation applied over a long duration can improve the growth and phenolic contents of sweet basil. *Frontiers in Plant Science*, *13*:858433. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.858433. EDN: https://elibrary.ru/LYLYHV
12. Kong, Y., Masabni, J., & Niu, G. (2023). Temperature and light spectrum differently affect growth, morphology, and leaf mineral content of two indoor-grown leafy vegetables. *Horticulturae*, *9*, 331. https://doi.org/10.3390/horticulturae9030331. EDN: https://elibrary.ru/YNFPLZ
13. Laubinger, S., Marchal, V., Gourrierec, J., Gentilhomme, J., Wenkel, S., Adrian, J., Jang, S., Kulajta, C., Braun, H., Coupland, G., & Hoecker, U. (2006). Arabidopsis SPA proteins regulate photoperiodic flowering and interact with the floral inducer CONSTANS to regulate its stability. *Development (Cambridge, England)*, *133*, 3213–3222. https://doi.org/10.1242/dev.02481
14. Li, J., Wu, T., Huang, K., Liu, Y., Liu, M., & Wang, J. (2021). Effect of LED spectrum on the quality and nitrogen metabolism of lettuce under recycled hydroponics. *Frontiers in Plant Science*, *12*:678197. https://doi.org/10.3389/fpls.2021.678197. EDN: https://elibrary.ru/VLMTTM
15. McLay, E. R., Pontaroli, A. C., & Wargent, J. J. (2020). UV-B induced flavonoids contribute to reduced biotrophic disease susceptibility in lettuce seedlings. *Frontiers in Plant Science*, *11*:594681. https://doi.org/10.3389/fpls.2020.594681. EDN: https://elibrary.ru/RQULFU
16. Ngilah, E., Tsan, F., & Kar, Y. (2015). Growth and yield of organic *Lactuca sativa* cv. Fire Red under irradiation of light emitting diode in controlled environment. *International Journal of Agriculture, Forestry and Plantation*, *1*. https://ijafp.org/wp-content/uploads/2015/10/AG-52.pdf
17. Ngilah, E., Tsan, F., & Yap, B. (2008). Photoperiod and light spectrum effects on growth, pigment and ascorbic acid content of *Lactuca sativa* cv. Fire Red under controlled growth environment. *International Food Research Journal*, *25*(2), 1300–1308. http://www.ifrj.upm.edu.my/25 (03) 2018/(57).pdf
18. Olle, M., & Viršile, A. (2013). The effects of light-emitting diode lighting on greenhouse plant growth and quality. *Agricultural and Food Science*, *22*, 223–234. https://doi.org/10.23986/afsci.7897. EDN: https://elibrary.ru/RHHNTL
19. Pennisi, G., Blasioli, S., Cellini, A., Maia, L., Crepaldi, A., Braschi, I., Spinelli, F., Nicola, S., Fernandez, J. A., Stanghellini, C., Marcelis, L. F. M., Orsini, F., & Gianquinto, G. (2019). Unraveling the role of red:blue LED lights on resource use efficiency and nutritional properties of indoor grown sweet basil. *Frontiers in Plant Science*, *10*:305. https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00305
20. Savvides, A., Ali, S., Tester, M., & Fotopoulos, V. (2016). Chemical priming of plants against multiple abiotic stresses: Mission possible? *Trends in Plant Sci-*

ence, *21*, 329–340. https://doi.org/10.1016/j.tplants.2015.11.003. EDN: https://elibrary.ru/XOYXGJ
21. Trumpler, K., Wu, B.-S., Addo, P. W., Macpherson, S., & Lefsrud, M. (2024). Plant growth optimization using amber light supplemented with different blue light spectra. *Horticulturae*, *10*(1097). https://doi.org/10.3390/horticulturae10101097. EDN: https://elibrary.ru/ZTANUB
22. Yang, L., Chen, L., Peng, H., Guo, P., Wang, P., Ma, C.-L., et al. (2012). Organic acid metabolism in *Citrus grandis* leaves and roots is differently affected by nitric oxide and aluminum interactions. *Scientia Horticulturae*, *133*, 40–46. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2011.10.011
23. Zhonghua, B., Ruifeng, C., Yu, W., Qichang, Y., & Chungui, L. (2018). Effect of green light on nitrate reduction and edible quality of hydroponically grown lettuce (*Lactuca sativa* L.) under short-term continuous light from red and blue light-emitting diodes. *Environmental and Experimental Botany*, *153*, 63–71. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2018.05.010

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Абрамова Светлана Владимировна, д.п.н., доцент, заведующий кафедрой безопасности жизнедеятельности, Академик Международной академии наук экологии и безопасности жизнедеятельности
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сахалинский государственный университет»
проспект Коммунистический, 33, г. Южно-Сахалинск, 693000, Российская Федерация
abramova_sv@list.ru

Бояров Евгений Николаевич, д.п.н., доцент, профессор кафедры безопасности жизнедеятельности, Академик Международной академии наук экологии и безопасности жизнедеятельности
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сахалинский государственный университет»
проспект Коммунистический, 33, г. Южно-Сахалинск, 693000, Российская Федерация
e.boyarov@mail.ru

Двойнова Наталья Федоровна, к.с.-х.н., доцент кафедры безопасности жизнедеятельности

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сахалинский государственный университет»
проспект Коммунистический, 33, г. Южно-Сахалинск, 693000, Российская Федерация
dnfsach@yandex.ru

Купцова Олеся Витальевна, к.т.н., доцент кафедры безопасности жизнедеятельности
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сахалинский государственный университет»
проспект Коммунистический, 33, г. Южно-Сахалинск, 693000, Российская Федерация
Korsuncevaolesy@gmail.com

DATA ABOUT THE AUTHORS

Svetlana V. Abramova, Holder of an Advanced Doctorate (Doctor of Science) in Pedagogic Sciences, Associate Professor, Heard of the Department of Life Safety
Sakhalin State University
33, Kommunisticheskiy Ave., Yuzhno-Sakhalinsk, 693000, Russian Federation
abramova_sv@list.ru
SPIN-code: 6335-3019
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-9863-5287
Scopus Author ID: 57191872091

Evgeniy N. Boyarov, Holder of an Advanced Doctorate (Doctor of Science) in Pedagogic Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Life Safety
Sakhalin State University
33, Kommunisticheskiy Ave., Yuzhno-Sakhalinsk, 693000, Russian Federation
e.boyarov@mail.ru
SPIN-code: 5413-4504
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-7283-1872
Scopus Author ID: 57191878704

Natalia F. Dvoinova, Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor of the Department of Life Safety
Sakhalin State University
33, Kommunisticheskiy Ave., Yuzhno-Sakhalinsk, 693000, Russian Federation
dnfsach@yandex.ru
SPIN-code 2253-5863
Scopus Author ID: 57207776940

Olesya V. Kuptsova, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Life Safety
Sakhalin State University
33, Kommunisticheskiy Ave., Yuzhno-Sakhalinsk, 693000, Russian Federation
Korsuncevaolesy@gmail.com
SPIN-code 3157-2353
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9555-3238
Scopus Author ID: 57363712800

Поступила 08.11.2024 Received 08.11.2024
После рецензирования 26.12.2024 Revised 26.12.2024
Принята 16.01.2025 Accepted 16.01.2025

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-4-1490 **EDN: VFTKXP**
UDC 631.41:631.45

Original article

PURIFICATION AND APPLYING DI LINH BENTONITE, LAM DONG, VIETNAM IN IMPROVING THE PROPERTIES OF CORAL SAND SOIL IN SEMI-ARID AND SALINE ISLANDS

C.T. Nguyen, D.N. Vu, T.H.T. Vo, T.T.T. Dinh, T.H. Le, M.T. Vu, V.T. Do, V.T. Nguyen

Abstract

Background. Vietnam's extensive coastline and numerous islands result in a large expanse of coral sand. This type of sand possesses distinct mechanical properties, including coarseness, low nutrient content, poor moisture and water retention, and high salinity. Globally, various methods are employed to improve sandy soils by modifying their physical, chemical, and nutritional properties to create favorable conditions for plant growth.

Purpose. The objective of this article is to evaluate the impact of bentonite on the surface structure of coral sand, with a focus on altering key factors such as density, bulk density, porosity, electrical conductivity (EC), cation exchange capacity (CEC), and the field moisture-holding capacity of sand particles.

Materials and methods. Bentonite powder used in this study was produced by Hiep Phu Lam Dong Joint Stock Company from the Di Linh bentonite mine in Lam Dong, Vietnam.

In this study, We use physicochemical analysis methods such as: X-ray diffraction (XRD) method, Fourier-transform infrared (FT-IR) spectroscopy, Scanning Electron Microscope (SEM) and some methods for determining the physicochemical properties of soils.

Results. In this study, raw bentonite from Di Linh, Lam Dong, supplied by Hiep Phu Lam Dong Joint Stock Company, was purified using the hydrocyclone method. The purified bentonite contains 69.0% montmorillonite and exhibits a cation exchange capacity (CEC) of 54.98 meq/100g, making it an excellent material for ameliorating the limitations of coral sand. Research findings demonstrated that the addition of bentonite in varying proportions significantly enhanced the physical and

chemical properties of coral sand. Key improvements included the increases in soil density (2.5–2.6 g/cm³) and bulk density (1.25 g/cm³), leading to a soil porosity of 50.02%. Furthermore, properties such as moisture retention and water-holding capacity were markedly improved due to the intrinsic characteristics of bentonite. At a supplementation rate of 3%, the cation exchange capacity (CEC) increased by over 83%, while electrical conductivity (EC) reached 470 µS/cm.

Conclusion. These enhancements are promising for improving the nutrient retention and exchange capacity of coral sand, thereby fostering better plant growth.

Keywords: bentonite; coral sand soil; sandy soils; saline soil; soil amendments

For citation. Nguyen, C. T., Vu, D. N., Vo, T. H. T., Dinh, T. T. T., Le, T. H., Vu, M. T., Do, V. T., & Nguyen, V. T. (2025). Purification and applying Di Linh bentonite, Lam Dong, Vietnam in improving the properties of coral sand soil in semi-arid and saline islands. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(4), 296-321. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-4-1490

Introduction

The island soil in Vietnam predominantly comprises coastal sandy soil. In Khanh Hoa Province, this sandy soil is characterized by a coarse mechanical composition, with 80–85% sand—primarily coral sand. It exhibits low porosity, poor nutrient content, and limited water retention capacity. Studies on sediment and soil in the major islands of Khanh Hoa Province have classified the area into five main geographic groups: (I) Bird guano soil group, (II) Primitive coastal sandy soil group, (III) Seasonal shifting sand group, (IV) Consolidated coarse sediment group, and (V) Coral limestone group. Notably, groups I and II are situated within fortified embankments, rendering them less vulnerable to natural factors and potentially suitable for reclamation and agricultural or other productive uses [1].

The natural conditions on islands play a crucial role in shaping the physical and chemical properties of the soil, as well as influencing the growth and development of plants. The natural environment and climate on islands, particularly those located far offshore, are notably harsh. These islands endure constant sun and wind, frequent storms, and freshwater scarcity, with many islands lacking tree cover. Additionally, some weather phenomena on islands differ significantly from those on the mainland. The average annual temperature on these islands is 27.8°C. The average humidity in Vietnam's island and coastal areas ranges from 82% to 83%, while relative humidity is slightly lower, fluctuating between 79% and 82%. Furthermore, relative humidity shows a noticeable daily variation, typically around 6% to 7%. [2].

The salinity of seawater in Vietnam's coastal regions is relatively high, with surface water salinity in offshore areas typically not exceeding 3.5%. However, around unsubmerged islands or within submerged areas, salinity levels can be even higher. This increase is primarily due to elevated evaporation rates and limited water circulation with the surrounding areas [3]. Given the aforementioned climatic conditions, transforming coastal sandy soil into arable land has become an urgent priority. Achieving this goal requires the implementation of innovative, environmentally friendly, and highly efficient technologies.

Various technologies have been developed to improve the fertility of sandy soil by enhancing its moisture retention and nutrient-holding capacity. These approaches often involve the use of water-retaining technologies to optimize rainwater usage and reduce the need for irrigation around plant roots. Commonly used materials include bentonite clay, carboxymethyl cellulose (CMC), biochar, and water-retaining polymers [4-8]. These materials work by binding sand particles, stabilizing soil structure, and increasing both moisture and nutrient retention, thereby supporting the healthy growth of plants.

Bentonite is derived from volcanic ash, with montmorillonite as its primary mineral component. Montmorillonite features a layered structure, giving bentonite its distinctive properties, including high swelling capacity, viscosity, and the ability to adsorb various substances [9]. Due to these characteristics, bentonite has been widely utilized for soil improvement. Beyond its ability to retain moisture, bentonite can also retain nutrients, absorb pollutants, and cleanse the soil and environment [10-15]. Bentonite is a natural mineral containing over 45 chemical elements with significant nutritional value, including CaO, MgO, SiO_2, and Al_2O_3. These properties make it highly versatile, leading to its widespread use in agriculture across many countries. Applications include producing animal feed, manufacturing fertilizers, and improving soil quality [16].

The use of bentonite to enhance soil productivity has been extensively studied and effectively applied in many countries [17-20]. Due to its excellent moisture retention and high adsorption capacity, bentonite is recognized as one of the most effective natural materials for soil rehabilitation, particularly for improving the fertility of sandy soils, which require substantial amendments for cultivation. Sandy soils are characterized by high water permeability, poor water retention, and a natural deficiency in nutrients. When moist, the swelling properties of bentonite help reduce capillary channels in the soil, allowing sandy soil to retain water more effectively and decreasing its permeability. By increasing soil moisture, bentonite also improves the thermal conductivity and heat capacity of sandy soils, further contributing to their overall fertility and suitability for cultivation [18].

Uses of bentonite for fertilizer and soil improvement: cation exchange properties; absorbent and binding properties; flocculation and rheological properties; high water absorption and water retention properties. In soil improvement, bentonite not only enhances moisture and water retention but also provides essential micronutrients to plants. Moreover, it is non-toxic and environmentally friendly, making it an ideal material for sustainable agricultural practices [20-25].

In 1973, Polish scientists from the Institute of Soil Science and Plant Cultivation in Pulawy, Poland, conducted pioneering research and applied bentonite for soil improvement [17]. Since then, numerous studies have been carried out globally. Starting in 2003, scientists from various countries, including Germany [4], Egypt [14], Tunisia [15], China [19; 25], Thailand [26-29], Vietnam [30-31], have further explored and applied bentonite to enhance soil quality.

Junzhen Mi et al. [12] and Lanying Zhang et al. [25] have studied the effects of bentonite as a soil amendment on field water-holding capacity, millet photosynthesis, grain quality, and the impact of combining bentonite with other amendments to improve soil quality for oat cultivation in semi-arid regions. Their studies demonstrated that bentonite significantly improved soil structure by decreasing soil bulk density and increasing soil porosity, microorganism activity, crop yield, and economic benefits. Furthermore, bentonite amendments enhanced the field water-holding capacity and increased the availability of water for plants.

The application of clay technology by farmers in northeast Thailand, specifically using bentonite clay, has significantly reversed soil degradation and increased economic returns through higher yields and improved output prices. Studies conducted by the International Water Management Institute and its partners in 2002–2003 focused on the use of locally sourced bentonite clays for rehabilitating degraded soils in the region. These studies involved structured field trials, which demonstrated that applying bentonite clay effectively enhanced the yields of forage sorghum cultivated under rain-fed conditions [26-27].

The application of bentonite also positively influenced the prices farmers received for their crops. Although production costs were higher, the increased yield and improved food quality enabled farmers using bentonite to invest in and grow more and better-quality food compared to those who did not use clay [28-29].

The South Central Coast of Vietnam (SCC VN) has approximately 339,000 hectares of sandy soils characterized by low clay content, low cation exchange capacity (CEC), low pH, low organic matter, and poor water and nutrient-holding capacities. As a result, these soils are infertile, leading to very low crop productivity [30]. Nguyen Hoai Chau et al. [31] studied the effects of bentonite on the cation exchange and moisture-retaining capacities of sandy soil in Ninh Thu-

an Province, focusing on its application for asparagus cultivation. Bentonite, a highly abundant natural soil improver in Vietnam, has an estimated reserve of more than 760,000 tons. These reserves are primarily concentrated in provinces such as Lam Dong, Binh Thuan, and Thanh Hoa, with montmorillonite mineral content ranging from 40% to 50% [32].

Researching, analyzing, evaluating, and applying Vietnamese bentonite resources to address the dry, drought-prone, and saline climate conditions of the Central Coast region holds significant scientific and practical value. However, there have been very few studies published on the composition of Vietnamese bentonite and its applications as a soil amendment in Vietnam.

The objective of this article is to evaluate the impact of bentonite on the surface structure of coral sand, with a focus on altering key factors such as density, bulk density, porosity, electrical conductivity (EC), cation exchange capacity (CEC), and the field moisture-holding capacity of sand particles.

Materials and methods

Materials and chemicals

Material: Bentonite powder used in this study was produced by Hiep Phu Lam Dong Joint Stock Company from the Di Linh bentonite mine in Lam Dong, Vietnam. The raw bentonite was collected from the mining site in Di Linh District, Lam Dong Province, and is locally referred to as Di Linh bentonite before undergoing preliminary treatment (Figure 1). Distilled water and HCl PA were also utilized in the study.

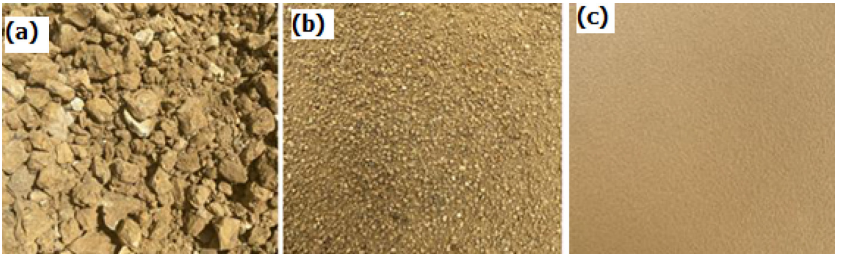


Fig. 1. Samples of bentonite (a) Bentonite ore; (b) Bentonite powder; c) Purification bentonite using the hydrocyclone method.

Analytical Methods

Fabrication of samples

Raw bentonite contains inorganic impurities and metal oxides located outside the crystal lattice, which can reduce its porosity. Therefore, treatment is

required to obtain purified bentonite. According to Hiep Phu Lam Dong Joint Stock Company, bentonite samples were processed using the hydrocyclone method, as illustrated in the diagram in Figure 2 [33-35]. The processing steps involve crushing the bentonite ore into powder, dispersing it in clean water, and grading it using the hydrocyclone method to obtain a suspension. The suspension is then thickened, and residues are removed. Using centrifugal separation, water is extracted, and the material is filtered, pressed, dried, and ground to produce a pure bentonite sample. These purified samples, produced by Hiep Phu Lam Dong Joint Stock Company, are referred to as HP bentonite. The processed bentonite has a particle size of <100 μm, a bentonite suspension concentration of 5–10%, and is treated under a pressure of 5 psi.

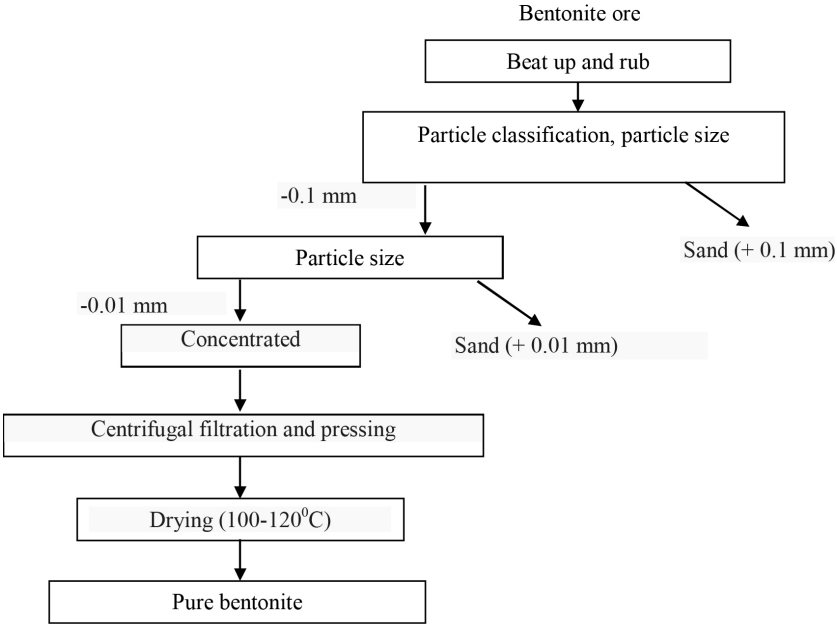


Fig. 2. Purification bentonite using the hydrocyclone method

Bentonite samples from Hiep Phu Lam Dong Joint Stock Company underwent further purification to enhance porosity using a 5% HCl solution. The samples were stirred thoroughly for 5 hours [34-35]. After soaking, the samples were allowed to settle, then washed to remove all traces of acid. Finally, the samples were dried and ground again to produce a pure bentonite sample, symbolized as P bentonite.

During the dissolution process with 5% HCl, substances such as CaO, Fe_2O_3, and Al_2O_3 present in bentonite can be separated and removed through the following reactions:

$Fe_2O_3 + HCl = 2FeCl_3 + 3H_2O$

$CaO + 2HCl = 2CaCl_2 + H_2O$

$Al_2O_3 + 6HCl = 2AlCl_3 + 3H_2O$

$MgO + 2HCl = 2MgCl_2 + H_2O$

The P bentonite was mixed with coral sand soil at weight ratios of 1%, 2%, 3%, 4%, 5%, 6%, and 7%.

Chemical composition

The bentonite sample was treated with a mixture of two acids, HCl and HNO_3. All elements dissolved into the solution, except silica (SiO_2), which was determined using gravimetric analysis. The other elements, including Al, Fe, Mg, Ca, Na, and K, were analyzed using an Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS). The analysis was conducted with a Shimadzu AA-6800 atomic absorption spectrometer (Japan).

Physicochemical characteristics of bentonite

Determination of Mineral Composition by X-ray Diffraction

The X-ray diffraction (XRD) method is one of the most common and effective techniques for determining the structure and crystallinity of materials. From the obtained XRD spectra, the structure and phase composition can be identified based on the quantity, position, and intensity of the peaks, allowing for the inference of lattice types and the determination of the material's nature. XRD is particularly effective in identifying the names and concentrations of minerals and clay minerals present in samples. In this study, material samples were analyzed using the XRD8–Advance system (Bruker, Germany) at the Institute of Chemistry, Vietnam Academy of Science and Technology.

Fourier-transform infrared spectroscopy (FT-IR)

Fourier-transform infrared (FT-IR) spectroscopy is used to identify the characteristic atomic groups within the structure of clay. This method complements X-ray diffraction by providing insights into the vibrational frequencies of functional groups present in the clay structure. The absorption of infrared radiation depends on the vibrational modes of groups such as OH, tetrahedral units (AlO_4 and SiO_4), and octahedral units (AlO_6, MgO_6). For analysis, bulk samples (approximately 1–2 mg) were milled, wet sieved to <40 μm, and dispersed in 120 mg of KBr. The mixtures were then pressed into pellets with a diameter of 13 mm. FT-IR spectra were recorded in the mid-infrared range (400–4000 cm^{-1}) using a Nicolet Magna-IR 760 spectrometer (USA). The analyses were conduct-

ed at the Institute of Tropical Ecology, Joint Vietnam-Russia Tropical Science and Technology Research Center.

Determination of Surface Structure

The morphology of the bentonite and sandy soil samples was analyzed using a Scanning Electron Microscope (SEM), Jeol JSM-IT200, at the Institute of Tropical Ecology, Joint Vietnam-Russia Tropical Science and Technology Research Center. Elemental composition analysis was conducted using the Energy Dispersive X-ray (EDX) method on an MS-7001F device (Jeol, Tokyo, Japan). The surface area of the samples was measured using a Tristar 3000 Micromeritics system, while thermal analysis was performed on a Labsys TG/DSC 1600, TMA-SETARAM machine, with a differential thermogravimetric analyzer (TG-DT-8121, France).

Determination of Density

Bulk density was determined based on ISO 11508:1998. After being dried to a constant weight, the soil samples were weighed using an analytical balance with a precision of 0.001 mg at the Laboratory of Biochemistry, Department of Biotechnology, Joint Vietnam-Russia Tropical Science and Technology Research Center.

Determination of Porosity

Soil porosity refers to the percentage of void spaces within the soil relative to its total volume. The porosity P(%) of the soil is calculated based on its density and bulk density.

The formula for determining porosity is:

$$P(\%) = \left(1 - \frac{d}{D}\right).100$$

Where: *d:* bulk density *(*g/cm^3)

D: density (g/cm^3)

Determination of Electrical Conductivity (EC)

The electrical conductivity (EC) of soil is commonly used to evaluate soil salinity or the concentration of other conductive substances that may impact crop yield and development. This measurement is typically performed by determining the EC of soil water or a solution in contact with the soil. The EC of the mixture is measured using an EC meter, with results expressed in units of mS/cm or µS/cm.

Determination of Water Retention Capacity

Water retention capacity was measured using the Funnel Method (FM)[10].

Determination of Field Water-Holding Capacity (WHC)

The Water-Holding Capacity (WHC), also known as water retention capacity, measures the total amount of water that can be absorbed per gram of ma-

terial. The maximum WHC is determined using the cylindrical sand soaking method [11].

Determination of Cation Exchange Capacity (CEC)

The mixed samples were treated with a 150 mg/L methylene blue solution for a specific duration. The absorption was then measured at a wavelength of 666 nm using a UV-Vis spectrophotometer equipped with a 10 mm glass cuvette (Model: 3101PC, Shimadzu, Japan) [12].

Results and discussion

Chemical composition of the HP bentonite

Based on the compositional analysis results of HP bentonite presented in Table 1, the largest component is SiO_2, accounting for 55.3%. The alkali metal elements are present in moderate to small amounts, including TiO_2 (0.63%), Al_2O_3 (23.9%), Fe_2O_3 (5.7%), MgO (0.9%), and CaO (0.4%). Other components constitute approximately 13.2% of the composition. The relatively high proportion of Al_2O_3 indicates a significant montmorillonite (MMT) content. The SiO_2 ratio of approximately 2.5 further supports the high MMT content. Additionally, the light brown color of the bentonite reflects its low iron content and high quality. The analysis also highlights the contributions of CaO and MgO to the cation exchange capacity (CEC) of the bentonite.

Table 1.

Chemical composition of bentonite

MxOy	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	CaO	Other Components
%	55.3	0.63	23.9	5.7	0.92	0.4	13.2

Physicochemical characteristics of bentonite

Mineral Composition of Bentonite

The results of the X-ray diffraction (XRD) analysis of the bentonite samples are presented in Figure 3. The XRD spectrum of Hiep Phu bentonite reveals the main characteristic peaks of montmorillonite (MMT), with a layer spacing d001 of 15 Å observed at a diffraction angle 2θ of approximately 6.94°, 19.81°, 35.92°, and 61.84° (Figure 3(c)) [38]. The predominant montmorillonite (MMT) structure in the Hiep Phu bentonite sample accounts for its high swelling capacity and water absorption ability.

The X-ray diffraction analysis in Figure 3(a) identifies Hiep Phu bentonite as an alkaline earth bentonite. The primary ion-exchange cations are Ca and Mg. The main mineral composition of Hiep Phu bentonite ore is montmorillonite, while the impurities include quartz (10–12%), feldspar (11–12%),

goethite (8–10%), hydromica (10–12%), chlorite (5–7%), and trace amounts of kaolinite and calcite. The montmorillonite content in Hiep Phu bentonite ranges from 55% to 57%. Compared to bentonite from other countries, such as Wyoming bentonite in the United States, which has a montmorillonite content of up to 80% [36], the montmorillonite content in Hiep Phu bentonite is relatively low. Therefore, cleaning and enrichment processes are necessary to increase the montmorillonite content for applications requiring high-quality bentonite.

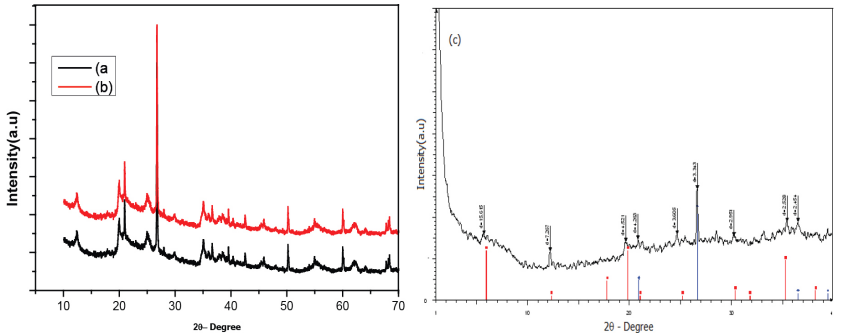


Fig. 3. XRD spectrum of the bentonite. (a) HP bentonite; (b, c) P bentonite

In Figure 3(b), the montmorillonite content is shown to have increased to 69%, with minimal quartz impurities (SiO_2) remaining. Additionally, metal oxide impurities located outside the bentonite crystal lattice, such as TiO_2, Al_2O_3, and Fe_2O_3, were almost entirely removed, leaving only undetectable traces. These findings are consistent with previous research results [38].

From the X-ray diffraction analysis, the montmorillonite (MMT) content was determined to be 69%, and the cation exchange capacity (CEC) measured at 54.98 meq/100g. Compared to other bentonite samples, these values are relatively high, indicating the potential for enhanced moisture retention and nutrient-holding capacity.

Surface structure analysis by SEM method:

The SEM image of the bentonite sample after cleaning with a 5% HCl solution shows uniform particle sizes with a round shape, ranging from 5 to 10 µm.

Analysis of the bentonite sample treated with 5% HCl using the SEM-EDX method revealed a significant reduction in the content of impurities such as Fe, Ti, and Al compared to the untreated Hiep Phu bentonite sample.

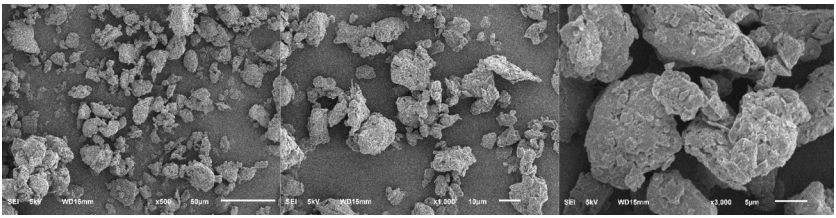


Fig. 4. Image SEM of bentonite after cleaning with 5% HCl solution (P bentonite).

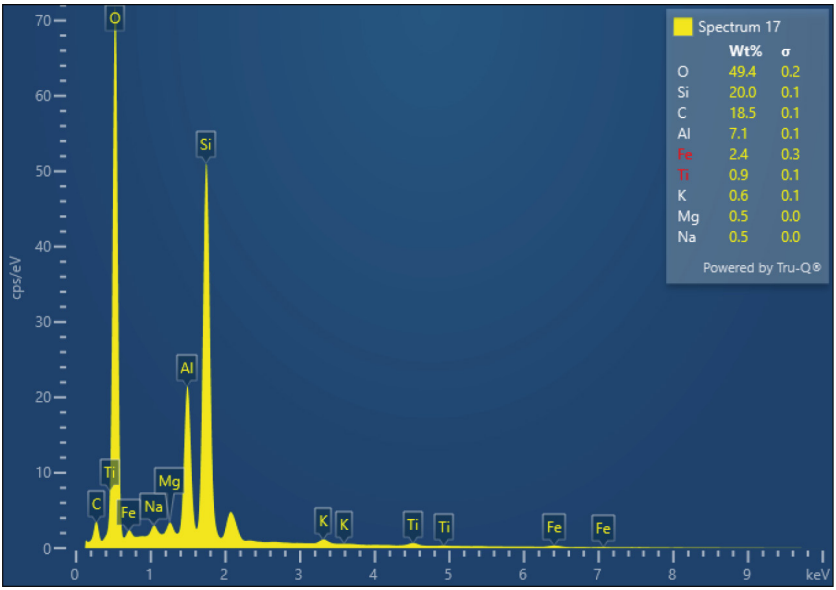


Fig. 5. EDX spectrum analysis of Hiep Phu bentonite sample after cleaning with 5% HCl solution (P bentonite).

The thermal analysis (TGA) results of the bentonite sample (Figure 6) revealed four endothermic peaks at temperatures of 70°C, 100.68°C, 287.5°C, and 498.62°C. The first and second peaks, at 70°C and 100.68°C, and the third peak at 287.5°C, are attributed to the physical dehydration of clay and the loss of organic matter, with a total mass loss of 1.17 wt%. The fourth peak at 498.62°C corresponds to the decarbonation of the sample, resulting in a mass loss of 6 wt%.

The results of BET surface area analysis (Figure 7) indicate that the treated bentonite sample has an average surface area of 45.716 m²/g. The average pore

size during the adsorption process is 8.7907 nm, while during the desorption process it is 7.4202 nm. The average pore size suggests that the adsorption process of bentonite substances occurs due to changes in the capillary pore structure. In comparison, the untreated sample had an average surface area of 30.255 m²/g. This comparison demonstrates that treatment and cleaning with 5% HCl significantly improved the surface area of the bentonite sample.

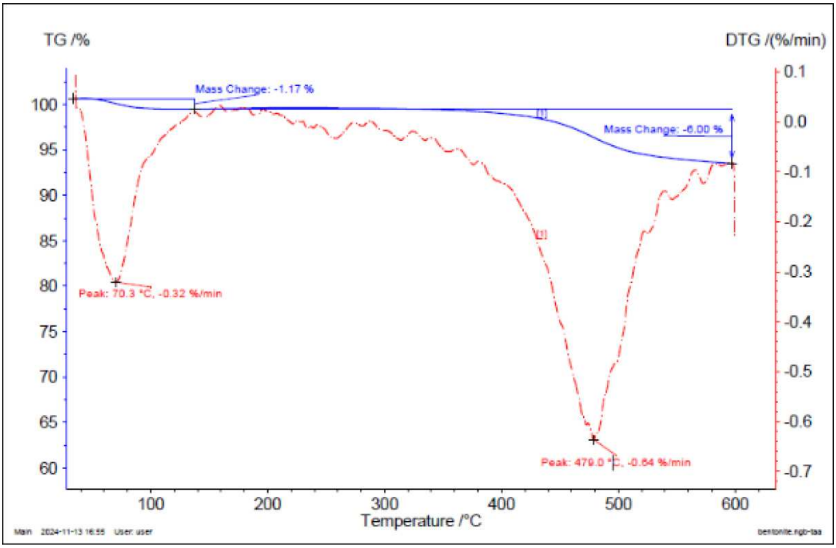


Fig. 6. TGA of P bentonite

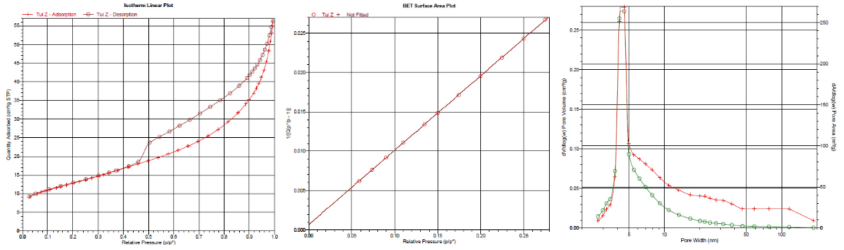


Fig. 7. (a) Adsorption isotherm N_2 adsorption of P bentonite; (b)BET plot of P bentonite; (c) Pore diameter distribution of P bentonite

From Figure 7(c), the pore size distribution of P bentonite is observed to be narrow and exhibit high intensity, indicating a uniform capillary system with pore sizes of less than 5 nm.

Fourier-transform infrared spectroscopy (FT-IR)

The FT-IR absorption spectra of the bentonite samples (Fig. 8) are characterized by absorption peaks around 3697, 3621, and 3454 cm^{-1}, intense peaks around 1032 cm^{-1}, and weak peaks near 912.7 and 796.9 cm^{-1}. Additionally, the Si-O bands at approximately 1040 cm^{-1} are indicative of montmorillonite. The characteristic spectral peaks for bentonite include the Si-O deformation vibration in the SiO_4 tetrahedron, observed in the range of 420–470 cm^{-1}, and the Al-O bond in the octahedron, found at 815 cm^{-1}. The OH^- group in the structure is represented by the spectral band in the range of 3400–3600 cm^{-1}. These peaks confirm the montmorillonite structure of the bentonite [38- 41].

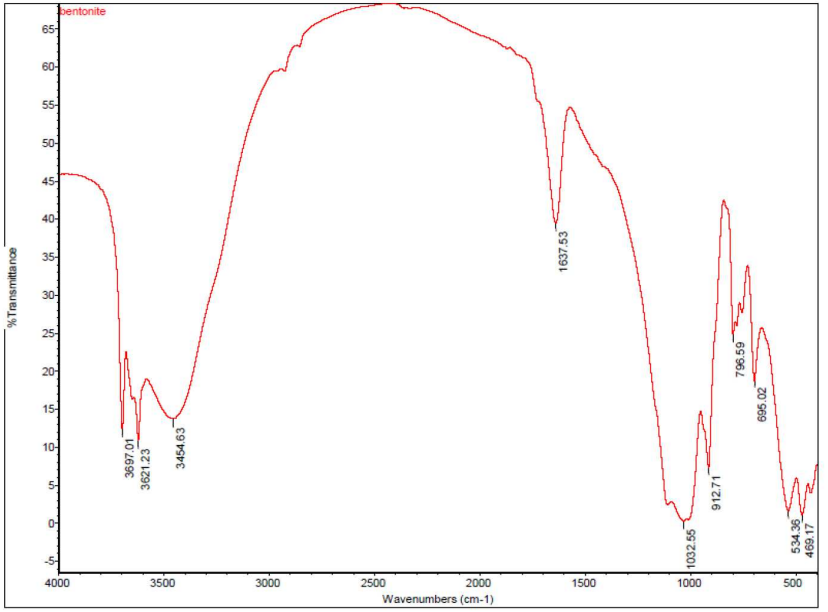


Fig. 8. FT-IR spectra of P bentonite.

Effects of Bentonite on Some Physical and Chemical Properties of Coral Sand Soil

Density

Density is a crucial parameter for assessing soil porosity. The density values for each mixture formulation can be determined using the previously described density measurement method. This allows for the identification of the optimal

formulation and the determination of appropriate component ratios to achieve the desired density values.

Soil density varies based on its type, composition, and structure. Density measurements will be carried out using the method previously described .

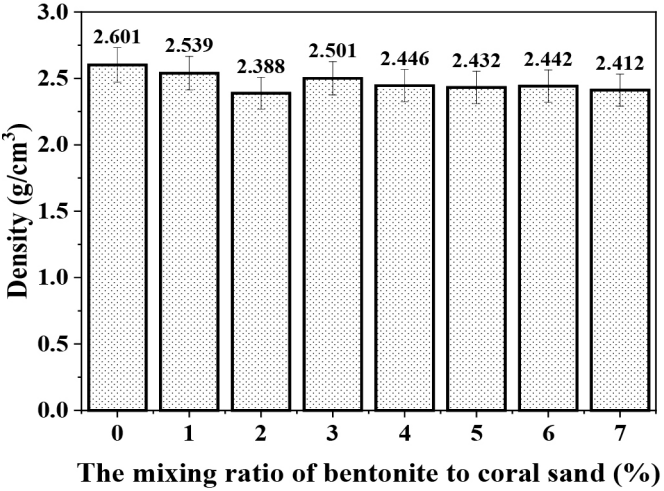


Fig. 9. Density of Coral Sand and Bentonite-Added Samples.
The data in the graph represents the average values of three repetitions. Data points with different superscripts (a, b, c, etc.) indicate significant differences at the 95% confidence level in the one-way Tukey comparison.

The measurement results indicate that the densities of the soil samples are relatively high, ranging from 2.5 to 2.6 g/cm³, which is characteristic of sandy soils primarily composed of coral sand particles. The addition of bentonite at concentrations of 1% to 7% slightly reduces the density of the sandy soil. This reduction can be attributed to the addition of bentonite, which alters the soil's mechanical composition by increasing the proportion of lighter clay particles, thereby lowering the overall density. Furthermore, incorporating more clay components helps balance the soil composition and enhances its fertility.

Bulk Density

Bulk density is closely related to soil porosity; higher porosity results in lower bulk density. For arable soils, an appropriate bulk density typically ranges between 1.0 and 1.25 g/cm³. A comparison will be made with the data presented in the accompanying graph.

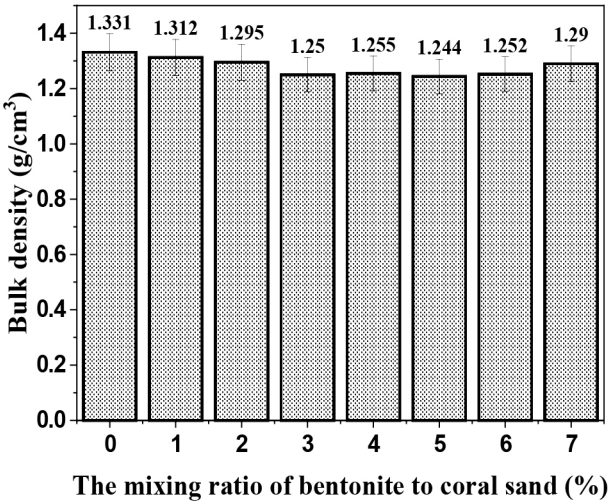


Fig. 10. Bulk Density of Coral Sand and Bentonite-Added Samples. *The data in the graph represents the average values of three repetitions. Data points with different superscripts (a, b, c, etc.) indicate significant differences at the 95% confidence level in the one-way Tukey comparison.*

It can be observed that at bentonite ratios of 3%, 4%, and 5% (w/w), the bulk density of the soil falls within the optimal range of 1.0–1.25 g/cm³, meeting the bulk density criterion for normal arable soil. However, at lower ratios (1–2%) or higher ratios (>5%), the bulk density deviates from this range, becoming either too high or too low. This deviation directly affects the soil's porosity and its suitability as arable land.

Porosity

Soil porosity refers to the small pores or open spaces within the soil. A porosity greater than 50% promotes good soil aeration, enabling CO_2 and nutrients to permeate quickly and easily. This is beneficial for soil organisms and root development. At a bentonite ratio of 3%, the soil mixture achieves a porosity of 50.02%, which is highly suitable for modifying soil properties. This can be attributed to the influence of factors such as particle structure, sample composition, compaction, and the amount of organic material present. Finer-textured samples exhibit a greater capacity to retain water compared to coarser samples. The 3% bentonite ratio provides an optimal particle structure, making it a promising solution for improving soil properties and enhancing agricultural cultivation.

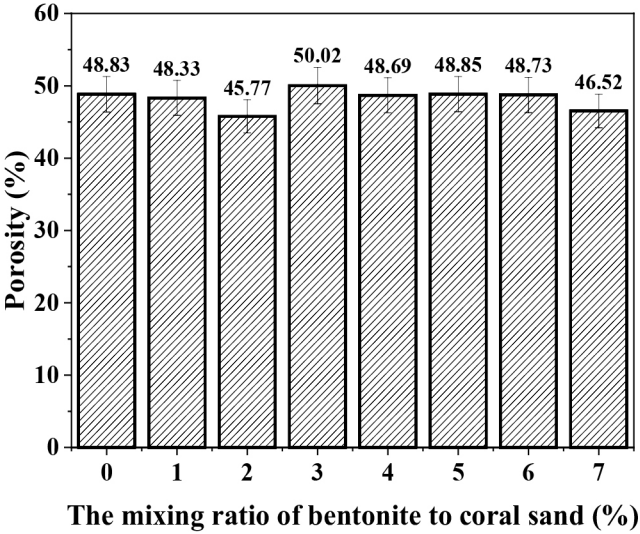


Fig. 11. Porosity of Coral Sand and Bentonite-Added Samples. *The data in the graph represents the average values of three repetitions. Data points with different superscripts (a, b, c, etc.) indicate significant differences at the 95% confidence level in the one-way Tukey comparison.*

Electrical Conductivity (EC)

Electrical conductivity (EC) reflects the mineral salt content in soil, often referred to as mineral nutrients for crops. An EC range of 200–1200 µS/cm is considered optimal for plant growth. Values below 200 µS/cm indicate nutrient deficiency, whereas values above 1200 µS/cm suggest nutrient surplus.

The results of the EC determination for the coral sand samples are presented in Figure 12.

The survey results indicate that when bentonite ratios greater than 2% are added to the sand, the EC index of the samples reaches an acceptable level, aligning with the goals of soil improvement. This finding is consistent with previous research by Hassan et al. [13], which evaluated the effects of bentonite on certain cereal crops in Egypt. This outcome can be attributed to the mineral components of bentonite, which enhance the cation exchange capacity (CEC) of sandy soil. The increased CEC boosts the soil's electrical conductivity, ensuring sufficient nutrients for plant growth and development following remediation.

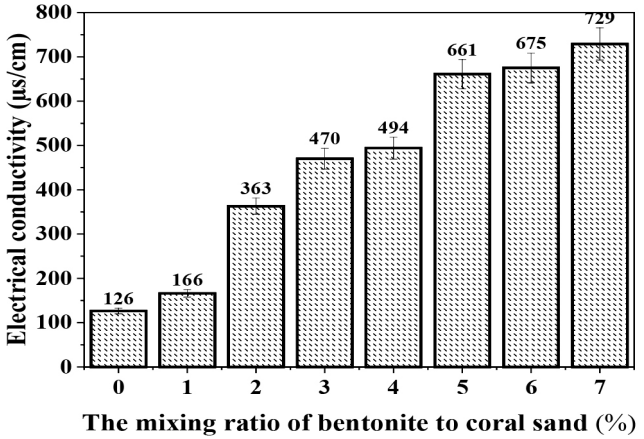


Fig. 12. Electrical Conductivity (EC) of Coral Sand and Bentonite-Added Samples. *The data in the graph represents the average values of three repetitions. Data points with different superscripts (a, b, c, etc.) indicate significant differences at the 95% confidence level in the one-way Tukey comparison.*

Assessment of Changes in the Surface Structure of Coral Sand

Observing Figure 13, the surface of the coral sand appears uneven (Figure 12a), with numerous edges, angles, and pores between the sand particles. This rough surface provides good adhesion for stabilizing materials.

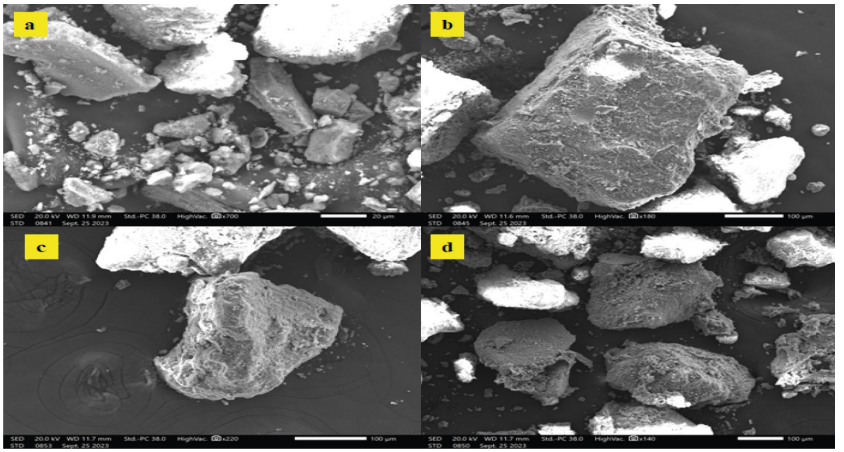


Fig. 13. SEM Images of Four Samples *(a) Coral Sand; (b) Coral Sand + 2%* BT;(c) Coral Sand + 3% BT; (d) Coral Sand + 5% BT.

For sand samples with 2–3% bentonite added (Figures 13b, 13c), a layer of bentonite is clearly visible covering the sand particles. This layer acts as a binding agent between the sand grains, increasing the surface area, filling the pores, stabilizing the soil structure, and enhancing moisture and nutrient retention. The addition of 5% bentonite yields similar results, where the bentonite surrounds, overlaps, or connects the sand grains. At 2% bentonite content, the bentonite-bound sand grains begin to form aggregates (Figure 13d), further contributing to soil stabilization and improved properties.

Water Retention and Moisture Storage

Water Retention

The experimental results indicate that coral sand has a relatively fast drainage rate and poor water retention capacity, leading to significant nutrient leaching with draining water. However, when bentonite is added to the coral sand, the drainage rate decreases sharply. At bentonite ratios of 1–3%, the drainage rate drops significantly, demonstrating a marked improvement in the water retention capacity of the bentonite-enhanced sand mixture (Figure 14).

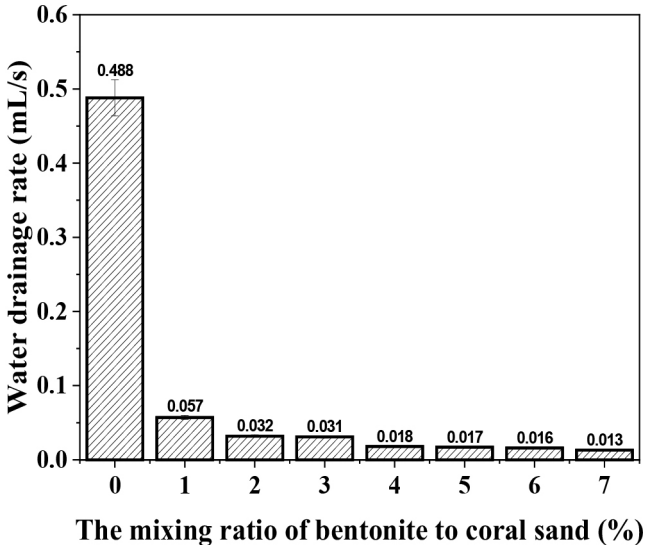


Fig. 14. Water Drainage Rate of Sandy Soil Before and After Bentonite Addition. *The data in the graph are the average values of three repetitions. Data with different superscripts (a, b, c, etc.) indicate significant differences at a 95% confidence level in one-way Tukey comparisons*.

This can be attributed to bentonite adhering to the sand particles, increasing their surface area. This bonding reduces the movement of water through the soil's voids, thereby decreasing drainage [10, 12]. At bentonite ratios of 4–7%, the water flow through the bentonite-enhanced sand mixture continues to decrease compared to the 3% ratio. However, excessively low drainage rates may lead to prolonged waterlogging in the lower soil layers, increasing the risk of flooding. This condition can result in root rot or damage to the root growth apex, adversely affecting crop health.

Field Water Holding Capacity

The results of the field water-holding capacity measurement (Figure 15) indicate that the increase in maximum water-holding capacity for sandy soil samples with 1–2% bentonite was minimal compared to the original sand. However, at a 3% bentonite ratio, the water-holding capacity increased significantly, reaching 14.7%, and continued to rise slightly with bentonite ratios of 4–7%. These findings align with studies by O. Semalulu (2013) [14], who utilized Ca-bentonite to enhance moisture retention and nutrient conservation in sandy soils in drought-affected areas of Uganda, and by Junzhen Mi et al. [15], who conducted similar experiments in the arid regions of northern China.

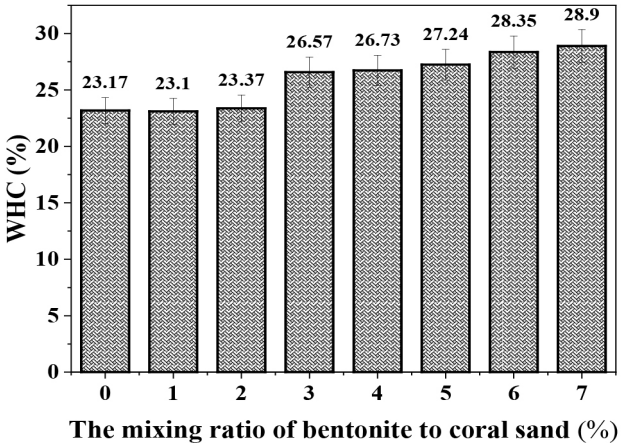


Fig. 15. Increase in Maximum Water Retention Capacity of Coral Sand and Bentonite-Amended Samples.
The data in the graph are the average values of three repetitions. Data with different superscripts (a, b, c, etc.) indicate significant differences at a 95% confidence level in one-way Tukey comparisons.

This can be attributed to the ability of water molecules to penetrate the structure of montmorillonite when water comes into contact with the soil. These molecules are retained within the crystal lattice of montmorillonite, resulting in improved soil moisture retention.Therefore, to enhance the moisture retention capacity of coral sand to 10% or higher, a bentonite ratio of at least 3% is necessary.

Cation Exchange Capacity (CEC)

The analysis of cation exchange capacity (CEC) (Figure 16) demonstrates a clear linear increase with the addition of bentonite to sandy soil. The CEC reaches an average value of over 83% at a 3% bentonite ratio and over 51% at a 2% bentonite ratio. These findings are consistent with previous research by Nissaf Karbout [16], who observed similar effects when bentonite was added to sandy soil in the arid regions of Tunisia.

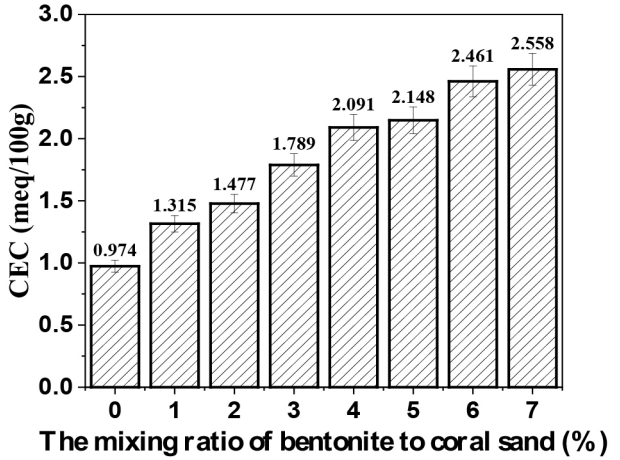


Fig. 16. CEC Changes in Sandy Soil Amended with Bentonite.
The data in the graph are the average values of three repetitions. Data with different superscripts (a, b, c, etc.) indicate significant differences at a 95% confidence level in one-way Tukey comparisons.

This can be explained by the varying amounts of bentonite added to the sand. Montmorillonite, the primary mineral in bentonite, is well-known for its high adsorption and ion exchange capacity. This high adsorption capacity arises from ion exchange occurring not only on the external surfaces of the crystals but also within the crystal structure, specifically between the basic layer packets. Consequently, the greater the amount of bentonite added, the higher the CEC value.

Conclusion

This study refined montmorillonite (MMT) from Di Linh bentonite, Lam Dong, using the hydrocyclone method, achieving an MMT content of >69% with a particle size of approximately 5 μm. The physicochemical properties and chemical composition of the refined bentonite were analyzed using XRD, SEM-EDX, BET, and other methods. The study evaluated the impact of bentonite on the surface structure of coral sand particles, influencing key soil properties such as specific gravity, bulk density, porosity, field moisture retention, and nutrient retention. At a 3% bentonite addition, SEM images revealed that bentonite effectively bonded sand particles, stabilizing the soil structure and significantly enhancing its physical and nutritional properties. Specifically, porosity increased to 50.02%, electrical conductivity (EC) rose 3.7 times to 470 μS/cm, and moisture retention improved substantially to 14.7%. These results demonstrate that incorporating a 3% bentonite ratio into coral sand is an effective strategy for converting coral sand into arable land.

Bentonite, which is abundant in Vietnam, offers a stable, long-term solution as it requires only a single application, unlike synthetic water-absorbing polymers that degrade over time and require periodic reapplication. Thus, applying bentonite may be a practical and effective approach for improving millet production in arid regions of the South Central Coast of Vietnam or in regions with similar environmental conditions.

This research serves as an initial study. Future work will focus on investigating the effects of bentonite on microbial activity, crop productivity, and the associated economic benefits.

Sponsorship information. This project is supported and implemented by the Laboratory of Biochemistry – Department of Biotechnology, Joint Vietnam - Russia Tropical Science and Technology Research Center.

References

1. Tuan, T. A. (2014). Research on landscape characteristics of coral islands in the Truong Sa archipelago. *Vietnam Journal of Marine Science and Technology*, *14*(3), 238–245.
2. Yet, N. H., & Thanh, D. N. (2008). Biological resources and ecosystems in the waters of the Hoang Sa and Truong Sa archipelagos. In: *Natural Science and Technology Publishing*. VietNam.
3. Duong, P. X. (2008). Some distribution features of temperature and salinity in the surface layer of the East Sea in summer and winter. *Institute of Oceanography*, 707–716.

4. Garbowski, T., Bar-Michalczyk, D., Charazińska, S., Grabowska-Polanowska, B., Kowalczyk, A., & Lochyński, P. (2023). An overview of natural soil amendments in agriculture. *Soil and Tillage Research*, *225*, 105462. https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105462. EDN: https://elibrary.ru/UCHGKY
5. Narjary, B., Aggarwal, P., Singh, A., Chakraborty, D., & Singh, R. (2012). Water availability in different soils in relation to hydrogel application. *Geoderma*, *187*, 94–101. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.03.002. EDN: https://elibrary.ru/XZULGD
6. Andrenelli, M. C., Maienza, A., Genesio, L., Miglietta, F., Pellegrini, S., Vaccari, F. P., & Vignozzi, N. (2016). Field application of pelletized biochar: Short-term effect on the hydrological properties of a silty clay loam soil. *Agricultural Water Management*, *163*, 190–196.
7. Mi, J. Z., Liu, J. H., Xu, S. T., Zhao, B. P., Yang, M. H., & Zhou, L. (2015). Effects of sandy soil amendment on soil moisture and growth status of millet with rainfed sandy soil in a semi-arid region. *Advanced Materials Research*, *1092*, 1234–1242.
8. Yu, J., Shainberg, I., Yan, Y. L., Shi, J. G., Levy, G. J., & Mamedov, A. I. (2011). Superabsorbents and semiarid soil properties affecting water absorption. *Soil Science Society of America Journal*, *75*(6), 2305–2313. https://doi.org/10.2136/sssaj2010.0397. EDN: https://elibrary.ru/XYYXXE
9. Nesse, W. D. (2012). *Introduction to mineralogy*. Oxford University Press.
10. Hassan, A. Z. A., & Mahmoud, A. W. M. (2013). The combined effect of bentonite and natural zeolite on sandy soil properties and productivity of some crops. *Topclass Journal of Agricultural Research*, *1*(3), 22–28.
11. Semalulu, O., Magunda, M., & Mubiru, D. N. (2015). Amelioration of sandy soils in drought-stricken areas through use of Ca-bentonite. *Uganda Journal of Agricultural Sciences*, *16*(2), 195–205.
12. Mi, J., Gregorich, E. G., Xu, S., McLaughlin, N. B., Ma, B., & Liu, J. (2017). Effect of bentonite amendment on soil hydraulic parameters and millet crop performance in a semi-arid region. *Field Crops Research*, *212*, 107–114. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.07.009. EDN: https://elibrary.ru/YGZCJN
13. Karbout, N., Moussa, M., Gasmi, I., & Bousnina, H. (2015). Effect of clay amendment on physical and chemical characteristics of sandy soil in arid areas: The case of ground south-eastern Tunisian. *Applied Science Reports*, *11*, 43–48.
14. Mi, J., Gregorich, E. G., Xu, S., McLaughlin, N. B., Ma, B., & Liu, J. (2021). Changes in soil biochemical properties following application of bentonite as a soil amendment. *European Journal of Soil Biology*, *102*, 103251. https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2020.103251. EDN: https://elibrary.ru/FALKRF

15. Mi, J., Gregorich, E. G., Xu, S., McLaughlin, N. B., & Liu, J. (2020). Effect of bentonite as a soil amendment on field water-holding capacity, and millet photosynthesis and grain quality. *Scientific Reports*, *10*(1), 18282.
16. Xu, C. Y., Hosseini-Bai, S., Hao, Y., Rachaputi, R. C., Wang, H., Xu, Z., & Wallace, H. (2015). Effect of biochar amendment on yield and photosynthesis of peanut on two types of soils. *Environmental Science and Pollution Research*, *22*, 6112–6125. https://doi.org/10.1007/s11356-014-3820-9. EDN: https://elibrary.ru/VGDEMD
17. Czaban, J., Czyz, E., Siebielec, G., & Niedzwiecki, J. (2014). Long-lasting effects of bentonite on properties of a sandy soil deprived of the humus layer. *International Agrophysics*, *28*(3). https://doi.org/10.2478/intag-2014-0018
18. *12th Botany: Practicals. Water holding capacity of garden soil and roadside soil* (2020). Retrieved from https://www.brainkart.com/article/Water-holding-capacity-of-garden-soil-and-roadside-soil_38350/
19. Darvishi, Z., & Morsali, A. (2011). Synthesis and characterization of Nano-bentonite by sonochemical method. *Ultrasonics Sonochemistry*, *18*(1), 238–242.
20. Sun, Z., Yu, J., Zheng, S. L., Bai, C. H., Dou, Z. L., Kong, W. A., & Shi, J. G. (2010). Effect of ion-type and concentration on water-retention capacity of bentonite used in geosynthetic clay liner. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, *38*, 1826–1831.
21. De Castro, M. L. F. A., Abad, M. L. B., Sumalinog, D. A. G., Abarca, R. R. M., Paoprasert, P., & de Luna, M. D. G. (2018). Adsorption of methylene blue dye and Cu(II) ions on EDTA-modified bentonite: Isotherm, kinetic and thermodynamic studies. *Sustainable Environment Research*, *28*(5), 197–205.
22. Soda, W., Noble, A. D., Suzuki, S., Simmons, R., Sindhusen, L. A., & Bhuthorndharaj, S. (2006). Co-composting of acid waste bentonites and their effects on soil properties and crop biomass. *Journal of Environmental Quality*, *35*(6), 2293–2301.
23. Yangwei, P., & Yan, S. (2012). Resources characteristics and market situation of bentonites at home and abroad. *Journal of Metal Mine*, *105*, 95–99.
24. Lerma, T. A., Chamorro, A. F., & Palencia, M. (2024). Effect of soil conditioners based on geomimetic materials on plant growth in degraded soils: Poly(acrylic acid)/bentonite. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *12*(5), 113567. https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.113567. EDN: https://elibrary.ru/GPWPMK
25. Zhang, L., Mi, J., Zhao, B., Cui, X., Hu, K., McLaughlin, N. B., & Liu, J. (2024). Soil amendment combining bentonite and maize straw improves soil quality cropped to oat in a semi-arid region. *Agronomy*, *14*(5), 1012. https://doi.org/10.3390/agronomy14051012. EDN: https://elibrary.ru/KICUZU

26. Noble, A. D., Ruaysoongnern, S., de Vries, F. P., Hartmann, C., & Webb, M. J. (2004). Enhancing the agronomic productivity of degraded soils in North-east Thailand through clay-based interventions. *Water in Agriculture*, *116*.
27. Suzuki, S., Noble, A. D., Ruaysoongnern, S., & Chinabut, N. (2007). Improvement in water-holding capacity and structural stability of a sandy soil in North-east Thailand. *Arid Land Research and Management*, *21*(1), 37–49.
28. Saleth, R. M., Inocencio, A., Noble, A., & Ruaysoongnern, S. (2009). Economic gains of improving soil fertility and water holding capacity with clay application: The impact of soil remediation research in Northeast Thailand. *Journal of Development Effectiveness*, *1*(3), 336–352.
29. Noble, A. D., Gillman, G. P., Nath, S., & Srivastava, R. J. (2001). Changes in the surface charge characteristics of degraded soils in the wet tropics through the addition of beneficiated bentonite. *Soil Research*, *39*(5), 991–1001.
30. Châu, N. H., Hà, N. V., Tựa, T. V., Hà, Đ. Q., Hảo, C. T., & Thùy, N. T. (2020). Effects of bentonite on cation-exchange and moisture retaining capacities in the sandy soil of Ninh Thuan province for asparagus cultivation. *Journal of Analytical Chemistry, Physics and Biology*, *25*(1), 81–85.
31. Thinh, N. T., Nhan, D. T., Vinh, H., Bao, P. V., Cuong, H. H., Hoa, H. T. T., Chon, N. Q., Truc, D. T. T., Mann, S., & Bell, R. (2021). Integrated management of soil, water and nutrition for crop production on sandy soils of the South Central Coast Vietnam. *Vietnam Journal of Agricultural Science and Technology*, *127*(6), 81–88.
32. Kiem, T. M., Huong, G. T., Huyen, T. T., & Huong, P. T. M. (2020). Study on creating any chemicals on bentonite facilities by characterization method for solid dragging of waste from the Lao Cai gold phospho production process. *Science-Technology, Hanoi University of Industry*, *10*, 230–233.
33. Gong, Z., Liao, L., Lv, G., & Wang, X. (2016). A simple method for physical purification of bentonite. *Applied Clay Science*, *119*, 294–300.
34. Gama, A. J. A., Neves, G. A., Barros, P. L., Neto, A. T. P., & Alves, J. J. N. (2020). Hydrocyclone performance for bentonite clay purification. *Chemical Engineering Research and Design*, *161*, 168–177. https://doi.org/10.1016/j.cherd.2020.07.005. EDN: https://elibrary.ru/FXFOHJ
35. Christidis, G. E., Scott, P. W., & Dunham, A. C. (1997). Acid activation and bleaching capacity of bentonites from the islands of Milos and Chios, Aegean, Greece. *Applied Clay Science*, *12*(4), 329–347.
36. ASTM. (2003). *Standard test method for methylene blue index of clay* (ASTM C837-99).
37. Wyoming Bentonite. Retrieved from https://main.wsgs.wyo.gov/mineral-resources/industrial-minerals/bentonite

38. Hoang-Minh, T., Kasbohm, J., Nguyen-Thanh, L., Nga, P. T., Lai, L. T., Duong, N. T., & Ferreiro Mählmann, R. (2019). Use of TEM-EDX for structural formula identification of clay minerals: A case study of Di Linh bentonite, Vietnam. *Journal of Applied Crystallography*, *52*(1), 133–147. https://doi.org/10.1107/S1600576718018162. EDN: https://elibrary.ru/MFCXRV
39. Yariv, S. (1996). Thermo-IR-spectroscopy analysis of the interactions between organic pollutants and clay minerals. *Thermochimica Acta*, *274*, 1–35. EDN: https://elibrary.ru/ALMVHX
40. Banik, N., Jahan, S. A., Mostofa, S., Kabir, H., Sharmin, N., Rahman, M., & Ahmed, S. (2015). Synthesis and characterization of organoclay modified with cetylpyridinium chloride. *Bangladesh Journal of Scientific and Industrial Research*, *50*(1), 65–70.
41. Alabarse, F. G., Conceição, R. V., Balzaretti, N. M., Schenato, F., & Xavier, A. M. (2011). In-situ FTIR analyses of bentonite under high-pressure. *Applied Clay Science*, *51*(1–2), 202–208.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Cong Tinh Nguyen: study conception and design, drafting of the manuscript. writing of the manuscript.
Duy Nhan Vu: study conception, editing of the draft of the manuscript.
Thi Hoai Thu Vo: writing of the manuscript.
Vinh Truong Do: editing of the draft of the manuscript.
Van Tu Nguyen: editing of the draft of the manuscript.
Thi Thu Trang Dinh: statistical data analysis.
Thi Hue Le: data collection and analysis.
Minh Tien Vu: statistical data analysis.

DATA ABOUT THE AUTHORS

Cong Tinh Nguyen, Researcher, Master, Research Assistant, Department of Biotechnology
Joint Vietnam - Russia Tropical Science and Technology Research Center
63, Nguyen Van Huyen Str., Nghia Do, Cau Giay, Hanoi, Vietnam
tinhdk2k48@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0009-0004-6535-6101

Duy Nhan Vu, Senior Researcher, Doctor of Science, Head of Laboratory
Joint Vietnam - Russia Tropical Science and Technology Research Center
63, Nguyen Van Huyen Str., Nghia Do, Cau Giay, Hanoi, Vietnam
vuduynhanvn@gmail.com

Thi Hoai Thu Vo, Researcher, Doctor of Science, Deputy Head of Laboratory
Joint Vietnam - Russia Tropical Science and Technology Research Center
63, Nguyen Van Huyen Str., Nghia Do, Cau Giay, Hanoi, Vietnam
thuvo3081@gmail.com

Thi Thu Trang Dinh, Researcher, Master of Science, Research Assistant
Joint Vietnam - Russia Tropical Science and Technology Research Center
63, Nguyen Van Huyen Str., Nghia Do, Cau Giay, Hanoi, Vietnam
trangdt1806@gmail.com

Thi Hue Le, Researcher, Master of Science, Research Assistant
Joint Vietnam - Russia Tropical Science and Technology Research Center
63, Nguyen Van Huyen Str., Nghia Do, Cau Giay, Hanoi, Vietnam
huelebiotech85@gmail.com

Minh Tien Vu, Biotechnology Engineer
Graduate University of Science and Technology
18, Hoang Quoc Viet Str., Cau Giay, Hanoi, Vietnam
minhtienvu0@gmail.com

Vinh Truong Do, Researcher, Master of Science, Research Assistant, Institute of Chemistry and Material
Vietnam Academy of Science and Technology
18, Hoang Quoc Viet, Nghia Do Ward, Hanoi, Vietnam
dovinhtruong@ib.ac.vn
ORCID: https://orcid.org/0009-0009-4976-5876

Van Tu Nguyen, Researcher, Master of Science, Research Assistant
Institute of Chemistry and Material
17, Hoang Sam, Cau Giay, Hanoi, Vietnam
nguyenvantu882008@yahoo.com

Поступила 25.12.2024
После рецензирования 01.02.2025
Принята 18.02.2025

Received 25.12.2024
Revised 01.02.2025
Accepted 18.02.2025

САДОВОДСТВО И ЛЕСОВОДСТВО

HORTICULTURE AND FORESTRY

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-4-1182 **EDN: VRGTWO**
УДК 634.232

Научные дискуссии

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАЛОПАХОТНОПРИГОДНЫХ ЗЕМЕЛЬ ДЛЯ ЛАНДШАФТНОГО И ТЕРРАСНОГО САДОВОДСТВА НА СКЛОНАХ СТАВРОПОЛЬСКОГО КРАЯ

Ф.Ф. Аполохов, С.Ф. Андрусенко, И.С. Усов

Аннотация

Обоснование. Благоприятные природно-климатические условия, соответствующие биологическим требованиям культуры черешни, имеют северные и северо-восточные склоны Ставропольского края, которые малопригодны для выращивания полевых культур. Современная агротехника производства недостаточно учитывает потребности черешни в хорошо дренированных почвах, относительно низкую морозоустойчивость и раннее цветение сортов, самоплодность культуры, высокие требования к подбору и размещению сортов-опылителей, а также организацию перекрестного опыления цветков различными видами насекомых.

Цель. Разработка мероприятий по выращиванию черешни на малопахотнопригодных склонах Ставропольского края крутизной до 15-20 градусов.

Материалы и методы. Исследования проводились с 2007 по 2024 гг. на опытно-производственных покато-пологих склонах в центральной и предгорной зонах Ставропольского края. При проектировании ширины полотна террас использовали рекомендации по уходу за сельскохозяйственными культурами. Определение агроэкологического и биологического потенциала садовых агроландшафтов проводили в соответствии с методиками сортоизучения плодовых, ягодных и орехоплодных культур. Полевые исследования проводились

согласно «Методическим рекомендациям по фитосанитарному и токсикологическому мониторингу плодовых пород и ягодников». Урожайность учитывали весовым методом.

Результаты. Существующие принципы обрезки и формирования крон малопригодны в черешневом саду. Не учитывается возможность реализация механизированных технологий обрезки и уборки урожая. Неравномерное выпадение осадков только у черешни имеет катастрофические потери урожая плодов из-за их растрескивания. Прогнозирование, профилактика и демпинговое регулирование абиотических факторов применяется редко.

Заключение. Предложены рекомендации по размещению и формированию структуры черешневых насаждений, уходу за урожаем, раскрыты возможности снижения себестоимости при совершенствовании сортового состава и машино-пригодности посадок.

Ключевые слова: черешня; рельеф; растрескивание; садопригодность; склоны; опылители; формировка; агротехника; уход за урожаем

Для цитирования. Аполохов, Ф. Ф., Андрусенко, С. Ф., & Усов, И. С. (2025). Использование малопахотнопригодных земель для ландшафтного и террасного садоводства на склонах Ставропольского края. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(4), 322-340. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-4-1182

Scholarly Discussions

THE USE OF LOW-ARROW LANDS FOR LANDSCAPE AND TERRACE GARDENING ON THE SLOPES OF STAVROPOL REGION

F.F. Apolokhov, S.F. Andrusenko, I.S. Usov

Abstract

Background. The northern and north-eastern slopes of Stavropol regio, which are unsuitable for growing field crops have favorable natural and climatic conditions that meet the biological requirements of the sweet cherry crop. Modern agricultural production technology does not sufficiently take into account the needs of sweet cherry in well-drained soils, relatively low frost resistance and early flowering of varieties, self-fertility of the crop, high requirements for the selection and placement of pollinator varieties, as well as the organization of cross-pollination of flowers by various types of insects.

Purpose. The aim was to work out the practical recommendations for growing cherries on low-arable slopes of the Stavropol region with a steepness of up to 15-20 degrees.

Materials and methods. The researches were conducted from 2007 to 2024 on experimental production gentle slopes in the central and foothill zones of the Stavropol region. While designing the width of the terrace fabric, there were used the recommendations for the care of agricultural crops. The agroecological and biological potential of garden agrolandscapes was determined in accordance with the methods of variety study of fruit, berry and nut crops. Field studies were carried out according to the "Methodological recommendations for phytosanitary and toxicological monitoring of fruit species and berry bushes". The yield was taken into account by the weight method.

Results. The existing principles of pruning and crown formation are of little use in a cherry orchard. The possibility of implementing mechanized technologies for pruning and harvesting is not taken into account. Uneven precipitation only in cherries has catastrophic losses of fruit yield due to their cracking. Forecasting, prevention and dumping regulation of abiotic factors are rarely used.

Conclusion. Recommendations are offered for the placement and formation of the structure of cherry plantations, crop care, the possibilities of reducing the cost price by improving the varietal composition and machine suitability of plantings are revealed.

Keywords: sweet cherry; relief; cracking; garden suitability; slopes; pollinators; shaping; agricultural technology; crop care

For citation. Apolokhov, F. F., Andrusenko, S. F., & Usov, I. S. (2025). The use of low-arrow lands for landscape and terrace gardening on the slopes of Stavropol region. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(4), 322-340. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-4-1182

Введение

Одной из доктрин продовольственной безопасности Российской Федерации является экономическое развитие агропромышленного комплекса и импортозаместительные подходы [6]. Инновационно-консультативный центр АПК констатирует, что выращиваемая в России продукция не полностью покрывает потребности россиян в сельскохозяйственной продукции [8]. Садоводство является социально значимой составляющий агропромышленного комплекса, производящие для населения важнейшие продукты, необходимые для полноценного питания человека [4]. Одним из основных условий интенсификации садоводства является рациональ-

ное использование земли для получения наибольшего экономического эффекта [9]. Решающее значение приобретает использование устойчивых методов ведения сельского хозяйства, которые позволяют производить качественную сельскохозяйственную продукцию [22]. Для Ставропольского края садоводство является одной из приоритетных и динамично развивающихся подотраслей аграрного сектора [3]. В связи с этим актуальным является наращивание производства плодово-ягодной продукции на эродированных почвах с почво-щебенчатыми и суглинисто-аллювиальными породами, преобладающих на склонах различной крутизны в Ставропольском крае, поскольку возможности механизированных технологий обрезки и уборки урожая в садах ограничивает крутизна склонов.

При освоении склоновых земель под плодовые культуры, эффективным в плане облегчения ухода за насаждениями считается террасирование [20]. Интерес представляют покато-пологие (10-20°) склоны пригодные для ландшафтного и террасного садоводств. Склоновые земли в большей степени удовлетворяют биологическим требованиям деревьев и кустарников, поэтому деревья на садо-пригодных склонах отличаются долголетием и хорошей стабильностью плодоношения. В целом, площадь садов может быть увеличена на 20-40% за счет преобразования склонов в террасные участки [19]. Большой опыт ведения садоводства на непахотнопригодных террасированных склонах накоплен в Кабардино-Балкарии [11; 18].

Южный регион России отличается благоприятными условиями для возделывания многих культур, среди которых особое место занимают косточковые [7]. Среди наиболее значимых косточковых культур России особое место занимает вишня и черешня [10]. За 2015-2020 годы площади плодово-ягодных насаждений на Северном Кавказе увеличились на 12,3% [5]. В Ставропольском крае количество благоприятных почвенно-климатических зон для садоводства ограниченно, в связи с чем актуально проведение мероприятий по агротехнике выращивания черешневых садов на склонах.

В большинстве исследований по развитию горно-террасного садоводства Кавказа основное внимание уделялось семечковым и орехо-плодным культурам. Работы по выращиванию черешни, совершенствованию агротехники и экономике производства в литературе не освящены.

Научная новизна данной работы заключается в оптимизации производственных и природных ландшафтно-экологических факторов, направленных на оптимизацию использования малопахотнопригодных земель, новых агроприемов культивирования черешни способствующих получе-

нию плодов высокого качества с применением средств механизированной обрезки крон и уборки урожая.

Цель исследования – разработка мероприятий по выращиванию черешни на малопахотнопригодных склонах Ставропольского края крутизной до 20°.

Материалы и методы

Исследования проводились с 2007 по 2024 гг. на опытно-производственных покато-пологих склонах в центральной и предгорной зонах Ставропольского края. Объектом исследования явились сады различных организационно-правовых форм хозяйствования Ставропольского края. При проектировании ширины полотна террас использовали рекомендации по уходу за сельскохозяйственными культурами [12]. Определение агроэкологического и биологического потенциала садовых агроландшафтов проводили в соответствии с методиками сортоизучения плодовых, ягодных и орехоплодных культур [13]. Полевые исследования проводились согласно «Методическим рекомендациям по фитосанитарному и токсикологическому мониторингу плодовых пород и ягодников» [16]. Урожайность учитывали весовым методом.

В опытном саду СПК «Долина» (Шпаковский район Ставропольского края) испытывали гнездовые посадки разнопородных деревьев, используя разные варианта посадки. Вариант 1 – посадка в одну увеличенную посадочную яму шелковицы белой + вишни-черешни. Для защиты урожая от птиц – этот пример положителен: птицы сосредотачиваются на шелковице. Вариант 2 – посадка в одну посадочную яму абрикос + сливу + персик + черешню с целью уменьшения негатива от почвоутомления. В обоих вариантах верхние горизонты занимали корневые системы шелковицы или персика, ниже – скелетные корни абрикоса (привитого на сеянцах кураги), не самую глубокую корневую систему имели черешни, привитые на сеянцы вишни магалебской.

В сроки проведения исследований включены работы по отбору сорто-подвойных комбинаций, выращиванию посадочного материала и проектированию предпосадочных почвозащитных мероприятий.

Результаты исследования

В Ставропольском крае количество благоприятных почвенно-климатических зон для садоводства ограниченно, главным образом это Предгорный район, юго-западная часть Минераловодского района, Кочубеевский,

Александровский, Андроповский и Шпаковский районы. В этих районах много склоновых земель. Особый интерес вызывают склоны горы Стрижамент. Сохранение почвенного плодородия на заповедных склонах Стрижамента имеет многогранное предназначение в экологическом и производственно-экономическом направлении. Этот район отличается сильной ветровой и водной эрозией, почвы сильно деградированы по причине антропогенного характера. На опушках Темного леса, покрывающего вершину Стрижамента, с 18 века местное население высаживало различные плодово-ягодные культуры. Плодовые деревья представлены дикими популяциями яблонь и груш. Произрастание многопородных лесных и полезащитных полос с включением диких плодовых деревьев подтверждает возможность ведения культурного садоводства. Одной из самых востребованной во всех регионах России, жизнестойкой культурой, произрастающей в пригородных поселениях городов Ставрополя, Невинномысска, Михайловска является черешня, сугубо южная культура. Черешневые сады успешно произрастают на склоновых, каменистых, умеренно эродированных почвах Ставропольского края, с сохранением биологической ценности плодов.

Во всех черешневых садах слабым технологическим звеном является недостаточная якорность деревьев, слабая зимостойкость штамбов, толерантность к почвогрунтам склоновых ландшафтов, чрезмерные объёмы и высота крон, затрудняющих проведение уходных работ и формирование крупных товарных партий плодов. Сады требуют подбора относительно небольшого набора наиболее востребованных потребителями сортов, сочетающих дружное созревание плодов, их высокую транспортабельность, сухой отрыв плодоножек, высокую устойчивость к наиболее вредоносным видам болезней и вредителей.

Рассмотрим параметры, влияющие на успешность освоения горно-склоновых земель под черешневые сады, в первую очередь это касается вопросов цветения и созревания. Большое влияние на начало цветения и скорость созревания плодов оказывают ветры. Южные склоны теплее, но внизу цветочные почки распускаются на 2-3 дня раньше, чем в средней и верхней части. На каждые 150-200 метров набора высоты, начало цветения деревьев одного сорта запаздывает на 1-2 дня. К периоду сбора урожая, разница во времени созревания плодов одного сорта увеличивается до 10-15 дней. Разместив ранние сорта у основания склона, а поздние ближе к вершине разница в сроках уборки плодов увеличится до 30 дней, что очень важно для сезонных культур.

В тесной взаимозависимости со сроками прохождения фенологических фаз деревьев проходит развитие болезней и вредителей. Сдерживая эпифитотии в нижних садах уменьшаются потери урожая и в верхних садах [2].

При выращивании черешни на склонах предгорий нужно учитывать особенности изменения погодных условий в период цветения. В саду СПК «Долина» за период с 2010 по 2023 гг на цветущий черешневый сад трижды выпадал снег и каждый второй год опускался многодневный туман. Отрицательное влияние этих факторов носит трудно прогнозируемый результат и может повторяться 2-3 раза за 7-10 лет. Частота повреждений цветущих косточковых садов от заморозков в долинах в 2-3 раза выше, чем на возвышенных склонах. Соответственно, противозаморозковую защиту предпочтительно организовать, начиная с нижних частей склона. Отчасти компенсировать потери от плохих погодных условий и увеличить урожайность садов можно за счет правильной организации и корректировки перекрестного опыления которое приводит к повышению урожайности до 25 % [15].

Благоприятные для работы пчел и нектаровыделения цветков температуры в 15-20 °С с южной стороны крон приходятся на промежуток времени между 11 и 13 часами, а с северной на 12-15 часов. Пчелы предпочитают массовое опыление цветов одной стороны ряда и реже перелетают поперек рядов, на которых растут деревья сортов - опылителей. Недобор урожая и преждевременное опадение завязей можно предупредить путем изменения схем размещения проверенных сортов. Безопасное перемещение пчелиных семей и пасек, используемых для опыления в радиусе 3-5 км, а размещение ульев мелкими группами, предпочтительно равномерно по всей территории сада. В сложных метеоусловиях горного ландшафта с преобладанием древесно-кустарниковой и многолетней травянистой растительностью активную роль переносчиков пыльцы традиционно выполняют многочисленные дикие виды пчелиных. В культурных садах успешно работают шмели диких энтомоцепозов, а также лабораторно размножаемые товарные гнездовья. Диапазон опылительной активности по нашим наблюдениям проходит при температуре верхнего слоя почвы выше +5 °С, а воздуха от 4 до 7 °С. Медоносные пчелы летной активности в этот период не проявляют. Перенос шмелиных домиков без риска слета рабочих особей можно проводить в радиусе 200-300 м в вечернее и ночное время [1].

Почва служит фундаментальным и ценным активом в садоводческой деятельности, а сохранение и восстановление качества почвы имеет решающее значение для обеспечения долгосрочной прибыльности и устой-

чивости этих операций. Плодородие почвы можно повысить, включив покровные культуры, которые добавляют в почву органические вещества, приводящие к укреплению структурной целостности и способствующие плодородию и оздоровлению почвы [21].

Непахотнопригодные участки были освоены без нарушения природного травостоя с применением полосного и сплошного залужения. Более плодородные кварталы равнины обрабатывали по типу черного пара и паросидерального возделывания местных эфемерных трав. На опытно-производственных участках площадью в 2-4 га каждый с крутизной склонов 12-18° в 2007-2008 гг были высажены различные сорта черешни, с разным сроком созревания, которые вступили в фазу активного плодоношения к 2022-2023 гг. (табл. 1).

Таблица 1.

Урожай черешни в СПК «Долина»

Сорт	Содержание почвы								Всего, кг/дер
	черный пар		дерново-перегной		природное залужение		эфемеры-сидераты		
	2022	2023	2022	2023	2022	2023	2022	2023	
Раннее созревание (28.05. – 13.06.)									
Ярославна	29,1	22,8	26,5	24,3	24,5	21,8	26,3	23,7	191,2
Валерий Чкалов	26,4	28,0	25,9	27,2	28,7	24,6	30,4	23,3	214,5
Бигарро Бурлат	24,0	23,8	22,8	26,0	28,1	24,4	22,8	25,1	197,0
Росинка	29,3	25,0	28,8	24,6	26,4	23,5	28,1	25,4	211,1
Среднее созревание (15.06. – 24.06.)									
Александрия	32,2	29,5	30,1	28,4	29,6	22,3	29,5	26,7	228,3
Этокская красавица	30,5	25,3	29,5	26,0	25,5	26,6	27,2	25,9	216,5
Ясно солнышко	34,2	38,0	37,0	35,1	36,8	35,4	25,4	37,2	170,1
Голубушка	36,7	35,1	36,4	33,6	32,9	32,7	33,1	32,5	273,0
Позднее созревание (25.06. – 08.07.)									
Регина	36,2	33,5	35,1	34,2	37,7	35,1	30,4	32,7	275,4
Дончанка	32,2	34,4	31,5	33,8	33,0	34,7	36,7	34,0	270,3
Генеральская	35,0	30,8	37,2	32,7	30,1	34,2	35,8	33,6	266,4
Скина	34,6	32,9	30,6	33,0	29,8	36,1	32,1	35,2	264,3
Подкумская поздняя	38,4	35,1	36,4	33,6	32,9	32,7	33,1	32,5	274,7
Итого	412,3	393,4	347,6	358,7	396,0	352,8	390,9	387,8	

Одной из главных проблем при выращивании черешни является растрескивание плодов. Отрицательное влияние на растрескивание оказывают

особенности почвенного и воздушного дренажа местности, недостаточная стрессоустойчивость растений и неоперативная работа садоводов по сохранению урожая. В разные годы у черешни повреждения отмечаются на ранних сортах, в другие – на поздних, но во всех случаях потеря товарного вида происходит быстро за 1-2 суток, что ведет к снижению рентабельности.

Анализ урожайности плодов за 2022-2024 гг показывает, что формирование размера и массы плодов черешни средних и поздних сроков созревания занимает большие сроки и превышает группу раннеспелых сортов. Но, одновременно, в урожае 2023 года отмечено существенное различие по качеству плодов, пострадавших от ливневых осадков в предуборочный период (13 июня 2023 г - 35 мм). Сорта среднего срока созревания в начале периода дождей испытывали наибольший стресс плодов и листьев. Растрескивание плодов достигло 82 % от общего (биологического) урожая (табл. 2).

Таблица 2.

Товарность плодов при разных способах содержания междурядий в черешневом саду в 2023 году, % от биологического урожая

Сорт	Содержание почвы по типу				Среднее, %
	черный пар	дерново-перегной	залужение многолетними	весеннее выращивание эфемеров	
Ранние сорта (сбор 28.05. – 13.06.)					
Ярославна	95,0	94,7	96,1	96,5	95,57
Росинка	91,5	92,3	94,4	94,8	93,25
Валерий Чкалов	97,0	96,8	95,9	97,2	96,72
Бигарро Бурлат	82,6	80,2	78,8	91,3	83,20
Средние сорта (сбор 15.06. – 24.06.)					
Александрия	36,2	38,4	40,2	63,5	44,57
Этокская красавица	25,5	28,1	30,7	75,9	40,05
Ясно солнышко	23,4	29,3	27,0	89,4	42,27
Наполеон розовый	17,2	19,6	21,4	65,6	38,87
Поздние сорта (сбор 25.06. – 08.07.)					
Регина	69,3	73,1	75,3	87,6	76,32
Генеральская	75,7	77,2	76,4	77,9	76,80
Голубушка	70,4	72,5	74,2	77,0	73,52
Дончанка	85,5	87,3	89,1	90,3	77,86
Скина	88,0	88,4	87,7	92,8	88,05

Существенно меньше было повреждено плодов у поздних сортов черешни. В реализацию поступило больше плодов с делянок засеянных эфе-

мерами. Особенно контрастна сохранность плодов на паровых клетках и эфемерных паросидератах. Экономический эффект от реализации плодов раннего и позднего сроков созревания существенно превысил доходность средних сортов. Чистая прибыль составила 225014 руб. с 1 га (416 дер/га) (табл. 3), что говорит о целесообразности выращивания ранних и поздних сортов черешни.

Таблица 3.

Реализация плодов черешни в 2023 году с одного учетного дерева

Сорт	Урожай, кг/дер		Товарность, %		Реализация, руб.	
	черный пар	эфемеры	черный пар	эфемеры	черный пар	эфемеры
Ранние сорта						
Ярославна	22,8	23,7	95,0	96,5	1751	1830
Росинка	25,0	23,3	91,5	94,8	1840	1767
Валерий Чкалов	28,0	23,3	91,5	94,8	2049	1767
Бигарро Бурлат	23,8	25,1	97,0	97,2	1847	1940
Средние сорта						
Александрия	29,5	26,7	36,2	63,5	854	1345
Этокская красавица	25,3	25,9	25,5	75,9	769	1578
Ясно солнышко	38,0	37,2	23,4	89,4	711	2606
Наполеон розовый	26,7	29,4	17,2	65,6	404	1543
Поздние сорта						
Регина	33,5	34,2	69,3	87,6	1857	2396
Генеральская	30,8	37,2	75,7	78,9	1865	2348
Голубушка	30,1	33,6	70,4	77,0	1695	2070
Дончанка	34,4	33,8	85,5	90,3	2353	2442
Скина	32,9	33,0	88,0	92,2	2316	2434
Подкумская поздняя	35,7	32,7	71,1	80,3	1996	2101

В период чрезмерного поступления влаги от весенне-летних ливневых дождей глубоко залегающие корни медленнее реагируют на эту ситуацию и не провоцируют излишнее поступление воды к «обезвоженным» точкам роста деревьев. Основными реципиентами почвенных элементов питания у плодоносящей черешни являются быстро растущие плоды. Плоды молодых плохо опыленных деревьев второго и третьего возрастного периода не проявляют высокую конкурентную способность, а мезофильные ткани и оболочка плодов не растрескиваются. Стрессовое состояние деревьев в период налива плодов можно ослабить и предупредить путем применения препаратов антидепрессантов, в том числе лигно-гуматов. Высаженные в

гнезда деревья дали по три урожая черешни, сливы, абрикоса, по четыре урожая персика, но признаков растрескивания плодов отмечено не было. Таким образом такой способ посадки можно рекомендовать для промышленного садоводства.

Одним из трудно прогнозируемых атмосферных явлений является град, наносящий ощутимый урон качеству урожая. Пролонгированное отрицательное влияние повреждений плодов после градобоя наблюдается в период вегетации, плоды остаются с зачатками спороносных болезней и личинок вишневых мух, в ранах побегов и коры ветвей поселяются паразитирующие лишайники, грибы и короеды. Сад после градобоя необходимо привести в нормальное фитосанитарное состояние. Без обрезки, фунгицидно-инсектицидной защиты, активизации почвенной фауны и флоры черешня в течение 5-7 лет начинает отмирать, посадки изреживаются. В саду закономерно возникает плодосмена. При гнездовых посадках с персиком, сливой абрикосом, унаби сад может иметь многолетнее товарно-экономическое продолжение [14].

На многие показатели химического состава плодов влияют не только место и способ выращивания черешни, но и способ формировки крон. Наибольшее влияние формировок многие исследователи отмечают на содержание сухих веществ и сахаров. Так, у сорта Василиса формируемого по типу Испанский куст плоды имеют кисло-сладкий вкус, с содержанием сахаров 10,3%, более сладкие плоды, сформированные по системе Стоп лидер содержат сахара в количестве 11,7%, а Фогель - 13,3% [17].

Обсуждение

Подвои и формировки являются основными элементами структуры черешневого сада. Планировать закладку любого сада без их учета нельзя. Проектируя сады на склонах ветроударных зон с неустойчивыми гидротермическими условиями, разным типом почвенных и почвообразующих пород, необходимо уделять должное внимание якорности корней и глубине их залегания.

Малогабаритные формировки на клоновых подвоях во многом определяют интенсивность садоводства. Долговечность деревьев и ширина междурядьев для прохода машин, создание необходимого «светового коридора», якорности корневых систем и отсутствие корневой поросли у этих сорто-подвойных комбинаций имеют много минусов.

В наших опытно-экспериментальных посадках с перспективой механизации зеленых операций, защитных мероприятий биологического и

абиотического порядков, уборочных работ предпочтительно иметь высокоштамбовые до 1,2 - 1,5 м кроны с одним ярусом скелетных ветвей, травмо- и термоустойчивыми качествами, малопривлекательными для вредной биофауны. Такие деревья лучше удаются путем высокой прививки на сеянцах вишни магалебской.

Формирование крон по типу «Корона КМВ» обеспечивает доступность применения обрезочных и уборочных механизмов (зеленых побегов, ветвей, плодов и вредных агентов на них обитающих). Этот метод можно использовать в дополнение к полноценной, высокомеханизированной агротехнике, селекционным успехам, правильным приемам формирования крон и реализации гарантированного плодообразования с учетом конкретных природно-климатических фитосанитарных и погодных условий.

Основные элементы кроны «Корона КМВ»:

1. Корневая система и штамб выращивают из сеянцев вишни маголебской.

2. Скелетные ветви формируются в один ярус на высоте 0,8 -1,2 метра с углом подъема 15-20 градусов. На каждой скелетной ветви через 30 40 см оставляют вертикально- растущие побеги – перспективные ветви плодоношения в 2-3 последующих года.

3. Плодоносящие ветви должны расти вертикально, без боковых ответвлений, рост которых предупреждают путем летней зеленой обрезки побегов в период съема плодов или в течение 30- 40 дней после его окончания. Такая формировка обеспечивает высокое качество плодов, позволяя сохранять гибкость плодовых ветвей и доступность приспособлений для уборки урожая.

На каждой отчуждаемой ветви масса плодов составляет 6-12 кг, а при наличии уборочного комплекса можно снимать плоды без травмирования. На 2-3 год плодоношения 25-50 % таких ветвей срезают на «пень» высотой 10-12 см от горизонтальной плоскости яруса скелетных ветвей. Циклическая смена плодовых ветвей позволяет сохранять стабильность плодоношения, хорошую засухо и морозостойкость.

Заключение

Для полного удовлетворения потребности населения Ставропольского края и северных регионов страны в плодах черешни необходимо пересмотреть территориальное размещение садов, их структуру и технологии выполнения уходных и уборочных работ. Природоподобные и биологизированные технологии при возделывании черешни более приемлемы, чем при выращивании семечковых и других косточковых культур. С хозяйственной точки зрения

размещение черешни на ровных долинных землях расточительно. Перевод черешневых садов на склоновые земли в зоне Северо-Кавказского региона позволит освободить порядка 200 тысяч гектаров равнинных земель пригодных для выращивания зерновых и технических культур.

Для уменьшения потерь от влияния абиотических факторов необходимо шире применять комплекс мероприятий физическо-механического и микробиологического порядков. На фоне обострения дефицита трудовых ресурсов главным фактором роста производительности труда должно быть предусмотрено специальное конструирование крон деревьев и машин для механизированной уборки (типа механизированных агроконвейеров с необходимой инфраструктурой). Испытан и предлагается для практического применения тип комбинированной кроны «Корона КМВ», разработанный сотрудниками Ставропольской опытной станции по садоводству.

Комплекс предложенных мероприятий позволит обеспечить потребности населения дешевыми и качественными плодами черешни, однако, без государственного участия в этих программах уменьшение дефицита черешни не будет.

Информация о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация о спонсорстве. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Список литературы

1. Аполохов, Ф. Ф., & Андрусенко, С. Ф. (2022). Организация и корректировка перекрёстного опыления в современных садах интенсивного типа. *Сельскохозяйственный журнал*, *4*(15), 4–15. https://doi.org/10.25930/2687-1254/001.4.15.2022. EDN: https://elibrary.ru/WVJIRO
2. Бакуев, Ж. Х., Кучмезов, Х. И., & Бишенов, Х. З. (2020). Инновации в сооружении ступенчатых террас под сады интенсивного типа. *Евразийский Союз Учёных (ЕСУ)*, *6*(75), 4–7. https://doi.org/10.31618/ESU.2413-9335.2020.6.75.873. EDN: https://elibrary.ru/TPCGIQ
3. Вайцеховская, С. С., Тельнова, Н. Н., & Токарева, Г. В. (2022). Современное состояние садоводства в Ставропольском крае. *Экономика: вчера, сегодня, завтра*, *12*(8А), 153–164. https://doi.org/10.34670/AR.2022.32.42.018. EDN: https://elibrary.ru/ZQYWGW
4. Велибекова, Л. А. (2022). Повышение эффективности производства и промышленной переработки плодово-ягодной продукции на основе интенси-

фикации. *Международный сельскохозяйственный журнал*, *65*(5), 511–516. https://doi.org/10.55186/25876740_2022_65_5_511. EDN: https://elibrary.ru/UGHONP

5. Велибекова, Л. А. (2021). Пути развития садоводства на Северном Кавказе. *АПК: Экономика, управление*, *11*, 70–80. https://doi.org/10.33305/2111-70. EDN: https://elibrary.ru/MNPIPV
6. Запорожец, Д. В. (2023). Инновационно-инвестиционное обеспечение устойчивого развития аграрного сектора экономики. *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экономика*, *31*(1), 59–73. https://doi.org/10.22363/2313-2329-2023-31-1-59-73. EDN: https://elibrary.ru/ROJADJ
7. Заремук, Р. Ш., Копнина, Т. А., & Кочубей, А. А. (2022). Интродукция представителей рода *Prunus* L.: перспективы их использования в южном садоводстве. *Известия НВ АУК*, *2*(66), 30–37. https://doi.org/10.32786/2071-9485-2022-02-03. EDN: https://elibrary.ru/VIVBIC
8. Бинатов, Ю. Г., Байдаков, А. Н., Запорожец, Д. В., & Назаренко, А. В. (2021). Инновационное развитие аграрного сектора экономики: проблемы и перспективы. *Национальные интересы: приоритеты и безопасность*, *17*(11), 2175–2200. https://doi.org/10.24891/re.16.12.2317. EDN: https://elibrary.ru/PRWZCA
9. Канарский, А. А., & Макарычев, С. В. (2019). К вопросу о совершенствовании технологии механизированной уборки урожая ягодных культур. *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*, *9*(179), 72–77. EDN: https://elibrary.ru/SVXFQM
10. Каньшина, М. В., Астахов, А. А., Мисникова, Н. В., & Яговенко, Г. Л. (2021). Оценка адаптивности сортообразцов вишни и черешни на юге Нечерноземья. *Селекция и сорторазведение садовых культур*, *8*(1–2), 45–48. https://doi.org/10.24411/2500-0454-2021-10114. EDN: https://elibrary.ru/EZXKQG
11. Кизима, Г. (2021). *Болезни и вредители сада и огорода*. Москва: АСТ. 160 с.
12. Припоров, Е. В. (2016). Анализ факторов, влияющих на ширину технологической колеи. *Известия Оренбургского аграрного университета*, *5*(61), 57–59. EDN: https://elibrary.ru/WYMYAH
13. Седов, Е. Н., & Огольцова, Т. П. (ред.). (1999). *Программа и методика сортоизучения плодовых, ягодных и орехоплодных культур*. Орёл: Изд-во ВНИИСПК. 608 с.
14. Аполохов, Ф. Ф., Есаулко, А. Н., Ермоленко, В. Г., и др. (2022). *Рекомендации по выращиванию унаби в Ставропольском крае*. Ставрополь: Агрус. 49 с.

15. Сеидов, А. К., & Гумбатова, Г. В. (2022). Влияние садов косточковых плодовых культур на развитие пчеловодства. *Бюллетень науки и практики*, *8*(5), 207–212. https://doi.org/10.33619/2414-2948/78/28. EDN: https://elibrary.ru/WAGASH
16. *Фитосанитарный и токсикологический мониторинг в садах и ягодниках. Методика опытного дела и методические рекомендации* (2002). Краснодар: СКЗНИИСиВ, 143–176.
17. Чалая, Л. Д. (2013). Качественные показатели плодов черешни, обусловленные формой кроны. *Плодоводство и виноградарство Юга России*, *24*(06). https://journalkubansad.ru/pdf/13/06/11.pdf
18. Abakumov, E. V., & Tembotov, R. Kh. (2023). Agriculture in the Baksan Gorge of the Central Caucasus, Kabardino-Balkaria. *Foods and Raw Materials*, *11*(1), 129–140. https://doi.org/10.21603/2308-4057-2023-1-561. EDN: https://elibrary.ru/ABDXKI
19. Deng, C., Zhang, G., Liu, Y., Nie, X. H., Li, Z., & Liu, J. (2021). Advantages and disadvantages of terracing: A comprehensive review. *International Soil and Water Conservation Research*, *9*, 344–359. https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2021.03.002. EDN: https://elibrary.ru/LRPAHS
20. Chen, D., Wei, W., & Chen, L. (2017). Effects of terracing practices on water erosion control in China: A meta-analysis. *Earth-Science Reviews*, *173*, 109–121. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.08.007
21. Narayanan, M., & Ma, Y. (2024). Recent progress on conservation and restoration of soil fertility for horticulture. *Chemosphere*, *362*, 142599. PMID: 38871188. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142599. EDN: https://elibrary.ru/NYCDCG
22. Tarolli, P., & Straffelini, E. (2020). Agriculture in hilly and mountainous landscapes: Threats, monitoring and sustainable management. *Geography and Sustainability*, *1*(1), 70–76. https://doi.org/10.1016/j.geosus.2020.03.003. EDN: https://elibrary.ru/ZHXEBU

References

1. Apolokhov, F. F., & Andrusenko, S. F. (2022). Organization and adjustment of cross-pollination in modern intensive orchards. *Agricultural Journal*, *4*(15), 4–15. https://doi.org/10.25930/2687-1254/001.4.15.2022. EDN: https://elibrary.ru/WVJIRO
2. Bakuev, Zh. Kh., Kuchmezov, Kh. I., & Bishenov, Kh. Z. (2020). Innovations in constructing stepped terraces for intensive orchards. *Eurasian Union of Scientists (EUS)*, *6*(75), 4–7. https://doi.org/10.31618/ESU.2413-9335.2020.6.75.873. EDN: https://elibrary.ru/TPCGIQ

3. Vaitsekhovskaya, S. S., Telnova, N. N., & Tokareva, G. V. (2022). Current state of horticulture in Stavropol Krai. *Economics: Yesterday, Today, Tomorrow*, *12*(8A), 153–164. https://doi.org/10.34670/AR.2022.32.42.018. EDN: https://elibrary.ru/ZQYWGW
4. Velibekova, L. A. (2022). Enhancing efficiency of fruit and berry production and industrial processing through intensification. *International Agricultural Journal*, *65*(5), 511–516. https://doi.org/10.55186/25876740_2022_65_5_511. EDN: https://elibrary.ru/UGHONP
5. Velibekova, L. A. (2021). Pathways for horticulture development in the North Caucasus. *AIC: Economics, Management*, *11*, 70–80. https://doi.org/10.33305/2111-70. EDN: https://elibrary.ru/MNPIPV
6. Zaporoets, D. V. (2023). Innovation and investment support for sustainable development of the agricultural sector. *RUDN Journal of Economics*, *31*(1), 59–73. https://doi.org/10.22363/2313-2329-2023-31-1-59-73. EDN: https://elibrary.ru/ROJADJ
7. Zaremuk, R. Sh., Kopnina, T. A., & Kochubei, A. A. (2022). Introduction of *Prunus* L. species: prospects for their use in southern horticulture. *Proceedings of NV AUK*, *2*(66), 30–37. https://doi.org/10.32786/2071-9485-2022-02-03. EDN: https://elibrary.ru/VIVBIC
8. Binatov, Yu. G., Baidakov, A. N., Zaporoets, D. V., & Nazarenko, A. V. (2021). Innovative development of the agricultural sector: challenges and prospects. *National Interests: Priorities and Security*, *17*(11), 2175–2200. https://doi.org/10.24891/re.16.12.2317. EDN: https://elibrary.ru/PRWZCA
9. Kanarsky, A. A., & Makarychev, S. V. (2019). On improving mechanized harvesting technology for berry crops. *Bulletin of Altai State Agricultural University*, *9*(179), 72–77. EDN: https://elibrary.ru/SVXFQM
10. Kanshina, M. V., Astakhov, A. A., Misnikova, N. V., & Yagovenko, G. L. (2021). Assessment of adaptability of cherry and sweet cherry varieties in the south of the Non-Chernozem Zone. *Breeding and Variety Development of Horticultural Crops*, *8*(1–2), 45–48. https://doi.org/10.24411/2500-0454-2021-10114. EDN: https://elibrary.ru/EZXKQG
11. Kizima, G. (2021). *Diseases and pests of gardens and vegetable plots*. Moscow: AST. 160 pp.
12. Priporov, E. V. (2016). Analysis of factors affecting the width of technological tracks. *Proceedings of Orenburg Agricultural University*, *5*(61), 57–59. EDN: https://elibrary.ru/WYMYAH
13. Sedov, E. N., & Ogoltsova, T. P. (Eds.). (1999). *Program and methodology for variety study of fruit, berry, and nut crops*. Oryol: All-Russian Research Institute of Selection and Horticulture (VNIISPK). 608 pp.

14. Apolokhov, F. F., Esaulko, A. N., Ermolenko, V. G., et al. (2022). *Recommendations for growing jujube in Stavropol Krai*. Stavropol: Agrus. 49 pp.
15. Seidov, A. K., & Gumbatova, G. V. (2022). Influence of stone fruit orchards on beekeeping development. *Bulletin of Science and Practice*, *8*(5), 207–212. https://doi.org/10.33619/2414-2948/78/28. EDN: https://elibrary.ru/WAGASH
16. *Phytosanitary and toxicological monitoring in orchards and berry plantations: Experimental methodology and guidelines* (2002). Krasnodar: North Caucasus Zonal Research Institute of Horticulture and Viticulture (SKZNIISiV), pp. 143–176.
17. Chalaya, L. D. (2013). Quality indicators of sweet cherry fruits depending on crown shape. *Fruit Growing and Viticulture of Southern Russia*, *24*(06). Retrieved from: https://journalkubansad.ru/pdf/13/06/11.pdf
18. Abakumov, E. V., & Tembotov, R. Kh. (2023). Agriculture in the Baksan Gorge of the Central Caucasus, Kabardino-Balkaria. *Foods and Raw Materials*, *11*(1), 129–140. https://doi.org/10.21603/2308-4057-2023-1-561. EDN: https://elibrary.ru/ABDXKI
19. Deng, C., Zhang, G., Liu, Y., Nie, X. H., Li, Z., & Liu, J. (2021). Advantages and disadvantages of terracing: A comprehensive review. *International Soil and Water Conservation Research*, *9*, 344–359. https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2021.03.002. EDN: https://elibrary.ru/LRPAHS
20. Chen, D., Wei, W., & Chen, L. (2017). Effects of terracing practices on water erosion control in China: A meta-analysis. *Earth-Science Reviews*, *173*, 109–121. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.08.007
21. Narayanan, M., & Ma, Y. (2024). Recent progress on conservation and restoration of soil fertility for horticulture. *Chemosphere*, *362*, 142599. PMID: 38871188. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142599. EDN: https://elibrary.ru/NYCDCG
22. Tarolli, P., & Straffelini, E. (2020). Agriculture in hilly and mountainous landscapes: Threats, monitoring and sustainable management. *Geography and Sustainability*, *1*(1), 70–76. https://doi.org/10.1016/j.geosus.2020.03.003. EDN: https://elibrary.ru/ZHXEBU

ВКЛАД АВТОРОВ

Аполохов Ф.Ф.: разработка концепции научной работы, сбор и анализ данных, составление черновика рукописи.

Андрусенко С.Ф.: редактирование черновика рукописи, написание рукописи.

Усов И.С.: сбор и анализ данных.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Fedor F. Apolokhov: study conception and design, data collection and analysis, drafting of the manuscript.

Svetlana F. Andrusenko: editing of the draft of the manuscript, writing of the manuscript.

Igor S. Usov: data collection and analysis.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Аполохов Федор Федорович, к.с.-х.н, старший научный сотрудник
Ставропольская опытная станция по садоводству — филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Северо-Кавказский федеральный научный аграрный центр»
ул. Мичурина, 2, пос. Ореховая Роща, Георгиевский район, Ставропольский край, 357803, Российская Федерация
svet1677@yandex.ru

Андрусенко Светлана Федоровна, к.б.н., доцент
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Кавказский федеральный университет»
ул. Пушкина, 1, г. Ставрополь, 355017, Российская Федерация
olimpbiochim@mail.ru

Игорь Сергеевич Усов, директор филиала
Ставропольская опытная станция по садоводству – филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Северо-Кавказский федеральный научный аграрный центр»
ул. Мичурина 2, пос. Ореховая Роща, Георгиевский район, Ставропольский край, 357803, Российская Федерация
soss.usov@mail.ru

DATA ABOUT THE AUTHORS

Fedor F. Apolokhov, Candidate of Agricultural Sciences, Senior Researcher
North Caucasus Federal Scientific Agrarian Center
2, Michurin Str., village Orekhovaya Grove, Georgievsky district, Stavropol merritory, 357803, Russian Federation
svet1677@yandex.ru
ORCID: https://orcid.org/0009-0008-2668-4769

Svetlana F. Andrusenko, Candidate of Biological Sciences, Associate Professor
North Caucasus Federal University
1 Pushkin Str., Stavropol, 355017, Russian Federation
olimpbiochim@mail.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9588-6902
ResearcherID: L-8343-2019

Igor S. Usov, Branch Director
Stavropol Experimental Station for Horticulture – branch of the North Caucasus Federal Scientific Agrarian Center
2, Michurin Str., village Orekhovaya Grove, Georgievsky district, Stavropol merritory, 357803, Russian Federation
soss.usov@mail.ru
ORCID: https://orcid.org/0009-0002-3162-5460

Поступила 23.10.2024 Received 23.10.2024
После рецензирования 13.12.2024 Revised 13.12.2024
Принята 27.12.2024 Accepted 27.12.2024

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-4-1192 **EDN: WDRGYK**
UDC 630*18:581.9

CC BY NC ND

Original article

STRUCTURAL AND FLORISTICS CHARACTERISTICS OF THREE TYPICAL SUCCESSIONAL STAGES OF THE TROPICAL EVERGREEN BROADLEAF FOREST IN KON CHU RANG NATURE RESERVE, GIA LAI PROVINCE, VIETNAM

T.T.T. Huong, N.D. Hoi, D.H. Cuong, N.T. Minh

Abstract

Background. Structural and floristic characteristics are a crucial aspect in proposing technical solutions for forest ecosystem restoration. The study was conducted in Kon Chu Rang Natural Reserve, Gia Lai, Vietnam. The differences in structure (such as density, tree size, abundance, diversity, species composition, etc.) between secondary and old-growth forests were shown in the several previous researches. However, within secondary forests, different histories of disturbance have resulted in very different stages of forest succession, despite the same length of time since human influence ceased and the same protection conditions. Secondary forests recovering after shifting cultivation, with directly light and fast-growing species, have higher density and abundance, while tree size indices and the number of dominant species are lower compared to secondary forests recovering after logging, which are mainly composed of shade-tolerant species. The research results provided a basis for group classification and the application of silvicultural measures to effectively promote forest recovery processes.

Purpose. To study the potential for natural successional recovery as a basis for proposing the application of silvicultural measures to rehebilitate the evergreen closed tropical rain forest in the Kon Ha Nung Biosphere Reserve.

Materials and methods. The subject of the study was the tropical evergreen broadleaf forest types in Kon Chu Rang Nature Reserve. In this study, satellite imagery (Landsat 8) was collected in the same season from 2013 to 2022 and Normalized Difference Vegetation Index was calculated to determine the forest successional stages of tropical evergreen broadleaf rainforest in Kon Chu Rang Nature Reserve.

The results of classification combined with field survey based on the establishment of 09 permanent sample plots (50×50 m, 2,500 m²) to ensure the forest successional stages. These plots were established in each typical successional stage (secondary forest after logging, secondary forest after shifting cultivation, and old-growth forest). In each plot, all live woody stems with a diameter at breast height greater than 10 cm were measured, including tree diameter at breast height and tree species. All data collected in each plot were then used for data analysis using SPSS software. This research conducted an ANOVA (Analysis of Variance) with a Fisher's Least Significant Difference post hoc test to explore differences between multiple group means of tree density, number of trees distribution in each group of tree diameter, tree diameter, basal area and tree diversity. In addition, to investigate forest structure and diversity, the Impotance Value Index, Shannon-Wiener Index (He') and Simpson Index, and Jaccard's coefficient of similarity were calculated in this study.

Results. Tree density ranged from 347 to 763 stems per hectare and total basal area from 15.5 to 42.8 m² per hectare. No significant difference was observed among the three forest types for tree diameter classes from 10 to 25 cm, while for tree diameter classes greater than 25 cm, old growth forest had the highest tree density, significantly different from the others. A decrease in tree density was observed in all forest types except old growth, which had the highest tree density and basal area for tree diameter classes greater than 25 cm. Diversity was found to be significantly higher in the old-growth forest compared to the secondary forest, which may be due to the duration of the restoration process and the initial stage of disturbance cessation. A total of 31 to 43 tree species were identified in 28-38 genera and 19-22 families, with the lowest species richness observed in the secondary forest after logging and only 3-7 tree species calculated in the tree composition. The dominant species in the post-logging secondary forest were heliophilous and fast-growing tree species such as Machilus parviflora, Macaranga tanarius, Litsea elongata, Clausena sp. and Prunus arborea, whereas in the post-shifting secondary forest they were shade-tolerant such as Rehderodendron truongsonense, Cinnamomum mairei, Castanopsis pseudoserrata, Litsea elongata, Syzygium wightianum. In particular, the associations of Clusiaceae and Myrtaceae species in old-growth forests were a novel finding.

Conclusions. It can be concluded that the structure and diversity characteristics of these successional stages exhibited remarkable variation. The old-growth forest had greater tree density, basal area, tree diversity and evenness than those of in secondary forest, along with the differences in number tree distribution, tree composition and diversity. These differences may come from the regeneration time and site condition. These results suggest that long-term monitoring and research are essential to assess restoration success over time.

Keywords: floristic characteristics; forest structure; Kon Chu Rang natural reserve; successional stages

For citation. Huong, T. T. T., Hoi, N. D., Cuong, D. H., & Minh, N. T. (2025). Structural and floristics characteristics of three typical successional stages of the tropical evergreen broadleaf forest in Kon Chu Rang Nature Reserve, Gia Lai Province, Vietnam. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(4), 341-361. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-4-1192

Introduction

The Kon Ha Nung Plateau Biosphere Reserve (KHN), situated in Gia Lai province, was designated a World Biosphere Reserve by UNESCO in September 2021. The reserve has a core zone encompasses the Kon Ka Kinh National Park and Kon Chu Rang Natural Reserve (KCR) covering a total area of 413,511.67 hectares. The biosphere reserve is distinguished by its high biodiversity and represents the evergreen closed forest ecosystem of the Central Highlands (Tay Nguyen) region in Vietnam. In addition to its ecological significance, the KHN plays a crucial role in climate regulation and water resources. This reserve contributes to the socio-economic development and ecological balance not only in the Central Highlands but also in the Central Coastal and South - Central regions of Vietnam. Nevertheless, despite its significance, the reserve continues to confront challenges associated with the decline of natural forests, both in terms of area and quality. The forest cover in the Central Highlands has consistently declined from 75-70% in 1976 to 60% during the 1980-1990 period [4]. The trend persists, with further reductions observed from 2019 to 2020, resulting in a loss of over 27,000 hectares of natural forest. Some of this area has been converted to open land or shrubland, while other parts have experienced natural regeneration [15].

Despite the implementation of substantial restoration initiatives within the KHN, certain areas remain significantly impacted, impeding their natural recovery [8]. The considerable extent of the forested area and the diversity of the local population present a complex set of management challenges. It is of paramount importance to gain an understanding of the dynamics of forest recovery if we are to be able to implement effective technical interventions with the aim of promoting restoration. Consequently, the KHN must prioritize the advancement of scientific knowledge and the development of effective conservation strategies for these invaluable forested areas.

Classifying and identifying the characteristics of forest restoration objects based on forest succession research is a crucial aspect in proposing technical

solutions for forest ecosystem restoration. Although there are several criteria for assessing forest restoration, there are few comprehensive criteria specifically for natural forest restoration in biosphere reserves. These criteria fall into two main groups: (1) structural and diversity criteria, and (2) functional criteria, including ecological and social functions [7; 17]. To flexibly apply previous research methods [8; 9; 16], characteristic forest objects for the study area were preliminarily identified using Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and field surveys conducted during 2013-2023. Sample plots will be established to represent three characteristic forest conditions: minimally impacted or undisturbed forest (old growth forest), post-logging recovery forest, and post-shift cultivation regrowth forest and used to determine the structural and floristic characteristics of these forest types.

In this study, our objective is to describe the floristic composition, species richness and similarity between two stages of forest regeneration using ecological indices in a tropical evergreen broadleaf forest in Kon Chu Rang Natural Resever. Emphasis will be placed on assessing structural characteristics and species composition across successional stages in an attempt to describe and manage the variability in physiognomy inherent in a regenerating forest. Satellite imagery and historical ground truth analysis were used to determine the successional stages of forest.

Material and methods

Research site

The Kon Chu Rang Nature Reserve encompasses an area of 719 km², with a designated conservation zone of approximately 159 km². This zone includes the Strict Protection Zone (~87.5 km²) and the Ecological Restoration Zone (~71.5 km²). It is notable that nearly 70% of the study area is comprised of rich forests, with a total forest volume exceeding 200 $m^3.ha^{-1}$, representing the highest proportion of mature forests within the Kon Ha Nung plateau. The reserve's forest ecosystem serves as an exemplary model of the evergreen broad-leaved forest typology found in the Central Highlands of Vietnam. A comprehensive botanical survey has documented 881 species and subspecies of plants within KCR, belonging to 547 genera and 162 families. Of particular note, 22 of these species are included in the Vietnam Red Book. It is also important to note that the reserve contains areas of poor forests, low-yield recovery forests, and non-forested land. Geographically, KCR is situated entirely within the Kon Ha Nung Plateau, with an average elevation ranging from 800 to 1,100 meters above sea level. The climatic conditions of the reserve are typified by an average annual

humidity of approximately 82% and an annual average temperature range of 18°C to 25°C. Moreover, the reserve experiences an average annual precipitation range of 2,000mm to 2,400mm year^{-1} [12]. In the study area, there are several types of soil, the most common of which are reddish brown soil on basalt (distributed in the southwest of the site) and gray soil on basalt (distributed in the northeast of the site) [8].

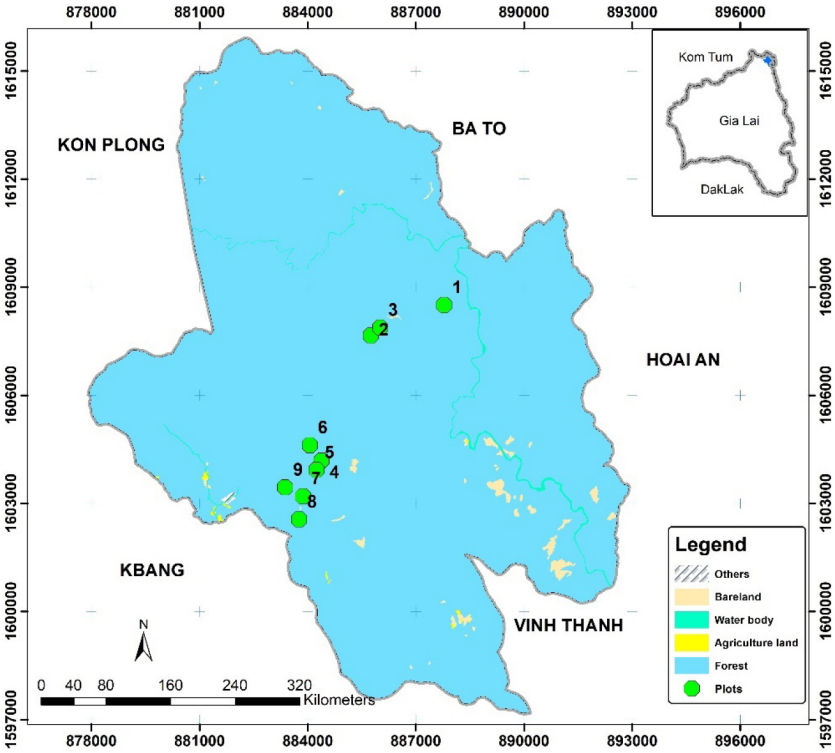


Fig. 1. Location of the research site and sample plots in the research area.

Site selection and field measurements

In order to identify the typical forest types in this study, a combination of satellite image analysis and field characterization was employed to select the study sites. Specifically, we employed LANDSAT 8 Collection level-2 images, which comprise two spectral bands (B4 and B5) with a spatial resolution of 30 meters during a same seasons from 2013 to 2022. The primary

tool employed for the assessment of vegetation was the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), a metric that has gained considerable traction in the field. The NDVI is derived from the red and near-infrared bands. The NDVI index values range from -1 to +1, with higher values indicating greater green vegetation cover. To establish thresholds for different forest stages, we referenced previous studies [5, 9]. In particular, NDVI values below 0,7 were indicative of intermediate succession stages, while NDVI values above 0,7 indicated late succession stages.

$$NDVI = (Band\ 5 - Band\ 4) / (Band\ 5 + Band\ 4) \quad (1)$$

In which: Band 4, Band 5 are Red and Near Infrared band of LANDSAT 8.

A total of 9 permanent sample plots (50×50 m, 2.500 m²) were established in August 2022, divided into each forest type, including old-growth forest (OGF), secondary forest after shifting cultivation (SCF), and secondary forest after logging (LCF). The diameter at breast height (DBH) of all living woody stems with a DBH equal to or greater than 10 cm was identified and measured. For multi-stemmed individuals, each stem with a DBH greater than 10 cm was considered a separate entity. All surveyed trees were assigned a unique code to facilitate the monitoring of successional dynamics. The descriptions of the three main forest types were adapted from Tab. 1.

Table 1.

The characteristic of three main forest type in the research site.

Successional stage	Canopy	Definition	Restoration time (year)
OGF	Evergreen broadleaf forest, more than 2 canopy layers.	Old-growth forest, less or non impacting by human activities, stable structure ∑ G (Basal area) >26 $m^2.ha^{-1}$	Minimally impacted / undisturbed forest
SCF	Evergreen broadleaf forest, more than 2 canopy layers.	Good restoration forest, more than 2 forest layers, ∑G (16-26 $m^2.ha^{-1}$)	30
LCF	Evergreen broadleaf forest, more than 2 canopy layers.	Good restoration forest, ∑G (10-16 $m^2.ha^{-1}$)	30

Species identification: Collaborating experts in plant classification (the Department of Botany and the Institute of Ecology and Biological Resources) join forces to identify species. During the fieldwork, unidentified plants were photographed, sampled, and their pertinent details-such as collection location,

coordinates, key characteristics, local names, and collector information were meticulously recorded. The primary purpose of this data is to facilitate subsequent laboratory analysis and species identification.

Data analysis

In this study, we assessed floristic composition, diversity, and similarity using both quantitative and qualitative indices. To calculate floristic composition, we employed the Importance Value Index (IV%), which combines relative dominance (Gi%) and relative abundance (Ni%). The IV% helps evaluate the significance of different species within a community.

$$\text{Relative dominance - Gi\%} = \frac{\text{Total basal area of the species}}{\text{Total number area of all species}} \text{ x } 100 \quad (2)$$

$$\text{Relative abundance - Ni\%} = \frac{\text{Number of individual of the species}}{\text{Total number of individuals}} \text{x } 100 \quad (3)$$

$$\text{IVi\%} = \frac{\text{Gi\%+Ni\%}}{2} \quad (4)$$

The Importance Value (IV) of each high trees species was determined as the sum of relative density (%) and relative dominance (%) to divide by two. For high trees species with IV ≥ 5% is really ecological significant and dominant species which participates in the composition formula of the communities. If a group of less than 10 species has IV index ≥ 40%, they are considered the dominant species group [24].

To estimate diversity we calculated the Shannon-Wiener index (He') and Simpson index (D1) [10] as below equations:

Shannon-Wiener index (He'):

$$\text{He'} = -\sum_{i=1}^{s} piln(pi) \quad (5)$$

Simpson index (D1):

$$D_1 = 1 - \sum_{i=1}^{s} pi^2 \quad (6)$$

Where, s - is the number of species and pi is the abundance of the species - As a propotion of the total number of stems accounted for all species), pi = $\frac{ni}{N}$.

In order to examine the floristic similarity between sample plots of all successional stages, we calculated Jaccard's coefficient of similarity (Cj) [14, 19].

$$Cj = \frac{a}{a+b+c} \quad (7)$$

Where: a - is the number of species found in both forest types;

b – is the number of species in forest type No1 but not in forest type No 2;

c – is the number of species in forets type No2 but not in forest type No 1.

All statistics analysis were performed using the SPSS v20.0.

Results and discussion

Site selection

NDVI is a widely used remote sensing index that quantifies vegetation greenness based on the difference NIR and RED band. Adapting to the previous research, this research employed continuous NDVI values within the range of <0.7 and >0.7 during the study period (2013-2023) and utilized LANDSAT 8 satellite imagery that was performed using Google Earth Engine [5, 9]. Using NDVI data continuously over multiple years could helps mitigate risks associated with using only the NDVI value from the most recent year. The preliminary phenological stages determined using this method were summarized in Tab. 2.

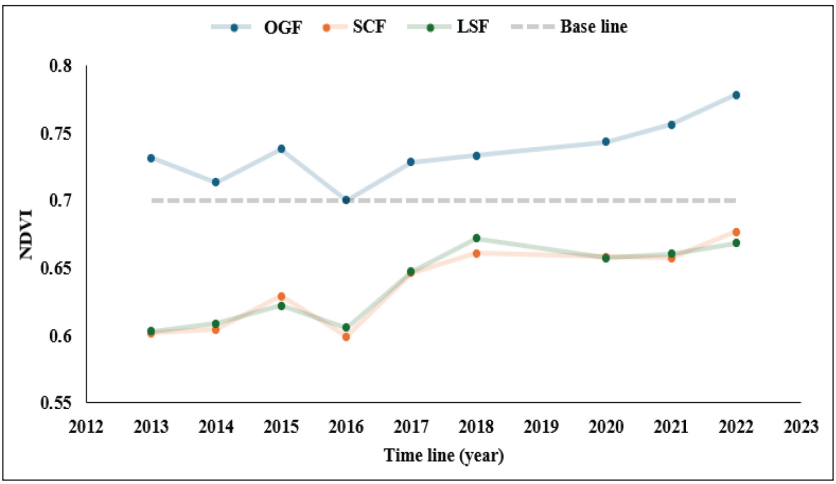


Table 2.

NDVI range of sample plots in the study site.

	OGF	SCF	LCF
NDVI range	0.736 ± 0.004	0.637 ± 0.006	0.630 ± 0.006

Fig. 2. NDVI change during 2013-2022.

In our study, we carefully selected sample plots that corresponded to the NDVI range and effectively represented different successional stages. The NDVI trend from 2013 to 2022 exhibited an upward trajectory, indicating successful forest restoration in the research areas (SCF and LCF) and stable

forests (OGF). Consequently, using NDVI as a reliable indirect indicator provides valuable insights into forest successional stages. In comparing 03 methods for determining forest successional stages in Dong Nai Biosphere Reserve using NDVI, forest volume based on the log-log diagram of forest structure (H (Total Height) = 100*DBH), and Non-Metric Multidimensional Scaling, the results showed reasonably high similarity in stage determination [5]. Additionally, NDVI was well-suited for identifying phenological stages in tropical dry forests in Costa Rica. Specifically, the early, middle, and late successional stages correspond to NDVI values in the following order: 0.43-0.58, 0.58-0.7, and 0.7-0.83 [9]. The NDVI-based classification results align well with field-collected data on successional stages. Similary conlusion also found that satellite imagery performs accurately in identifying successional stages [6; 16].



Fig. 3. Image of sample plots (a: LCF, b: OGF, c: SCF).

Structural and diversity characteristic

Canopy tree density varies significantly across three forest types. Specifically, tree density (stems.ha^{-1}) were 763 ± 54 for OGF, 696 ± 17 for SCF, and 347 ± 10 for LCF (Tab. 3). LCF had the lowest tree density, significantly different from both OGF and SCF (Sig. < 0.05). However, no significant difference was observed among the three forest types for DBH classes ranging from 10 to 25 cm (Fig. 4). For trees with a DBH larger than 25 cm, OGF showed the highest tree density, significantly different from the others (Sig. < 0.05). The total basal area values (G, m^2.ha^{-1}) for different DBH classes in OGF, SCF, and LCF were 42.8±2.4, 19.6±2.7, and 15.5±0.1, respectively. Post-hoc LSD tests in SPSS indicate that OGF's average basal area was significantly higher than the other forest types (Sig. < 0.05). However, there was no significant difference between SCF and LCF (Sig. > 0.05). The distribution of basal area by DBH classes shows higher values in secondary forests compared to OGF for all DBH classes under 25 cm (Fig. 5).

Table 3.

Structural characteristics of the three plots in each of the three typical successional stages

Successional stage	Plot No.	Tree density (*Stems.ha*$^{-1}$)	Shanon (*He'*)	Simpson (D_1)	G ($m^2.ha^{-1}$)
OGF	1	656	3.42	0.95	38
	2	808	3.29	0.95	44.9
	3	824	3.1	0.93	45.4
	Mean±SE	763 ± 54	3.27 ± 0.16	0.94 ± 0.01	42.8±2.4
SCF	1	720	2.97	0.9	20.4
	2	704	2.92	0.89	20.2
	3	664	3.07	0.92	18.27
	Mean±SE	696 ± 17	2.99 ± 0.08	0.90 ± 0.02	19.6±2.7
LCF	1	352	2.97	0.92	15.23
	2	360	3.14	0.94	15.66
	3	328	3.12	0.94	15.67
	Mean±SE	347 ± 10	3.08 ± 0.09	0.93 ± 0.01	15.5±0.1

SE: standard error.

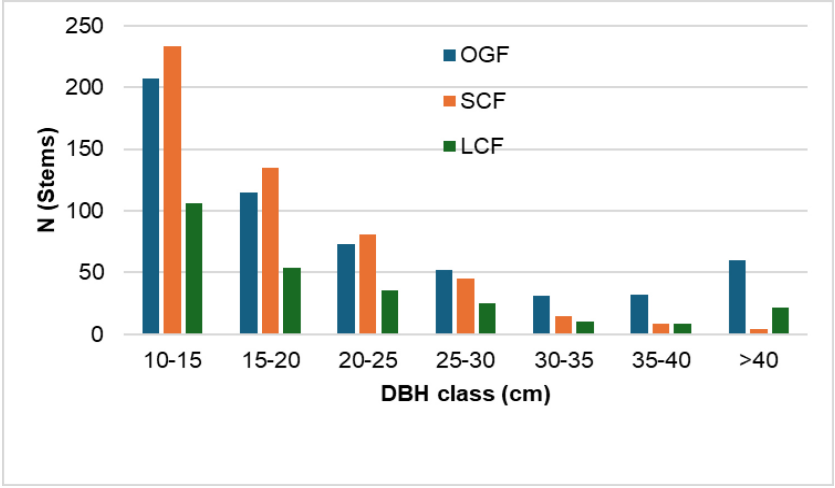


Fig. 4. The tree density of canopy trees in OGF, SCF, LCF of study area.

Diversity indices, especially D1 and He', were 0.94 and 3.27 for OGF, exceeding those of secondary forests (Tab. 3). In the case of the OGF was considered as the climax community, this suggests that the old-growth forest had

greater diversity and evenness. D1 and He' were significantly higher in OGF than in the two secondary forests. This finding was consistent with a general increase in diversity during the process of natural succession toward the climax community [18]. Notably, SCF showed an inverse trend in tree species diversity despite a significantly lower tree density than LCF. Floristic similarity between forest types, denoted as (Cj), ranged from 0.24 to 0.35, with the highest (Cj) value of 0.35 found between LCF and SCF. In this study, the floristic similarity (Cj) between SCF, LCF and OGF was low, in`dicating a significant difference in floristics. The reason may be due to the regeneration time. The short time of regeneration in SCF and LCF could explain the low similarity, because restoration time determines the degree of similarity between forest types in different successional stages. The low similarity between the primary and secondary forests owning to the short time during which secondary forests have regenerated [18]. SCF and LCF had similar floristics owning to being same as in their successional stages.

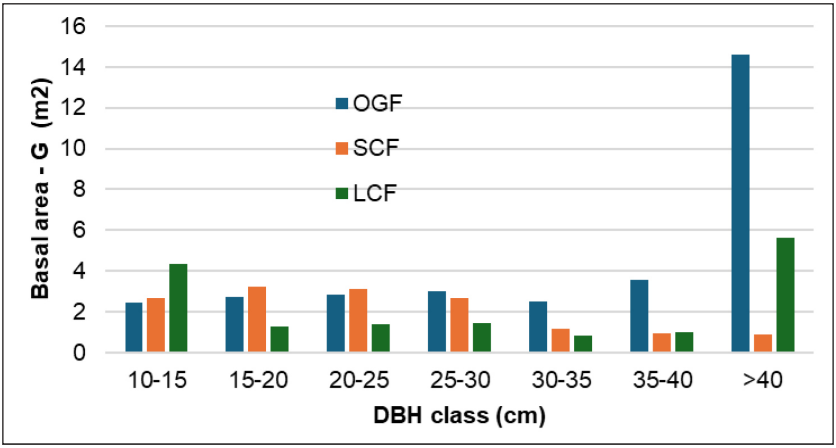


Fig. 5. Distribution of basal area of canopy tree by DBH class in three forest types.

This study demonstrates that following over 30 years of disturbance cessation in SCF and LCF forests, the overall tree density trend was declining. However, recovery potential, as measured by density and total basal area (ΣG), exhibits distinct variations. While SCF density has nearly reached that of OGF, it remained concentrated primarily in smaller diameter classes (<25 cm DBH). This suggests robust recovery for SCF forests, although they have not achieved the same high state as OGF , particularly in terms of ΣG (ap-

proximately half that of OGF). This discrepancy may be attributed to specific growth characteristics during forest recovery. Despite a significant increase in tree numbers, a shortage of large-diameter trees persists, resulting in a substantially lower of ΣG. In contrast, LCF, despite having the lowest density, does not significantly differ in total basal area compared to SCF forests. Notably, LCF exhibited a higher density of large trees than SCF (>40 cm DBH). This was also a significant difference of the LCF forest in the study area compared to other areas because the characteristics of LCF forest are concentrated with many small-diameter tree species [20]. The complexity of recovery outcomes over time may arise from several factors such as (1) insufficient cessation duration and mechanical division, failing to fully reflect the essence of succession; (2) varying site conditions leading to different recovery rates despite the same cessation duration [8]; (3) differences in forest states at the time of cessation, resulting in significant fluctuations in their current characteristics; and (4) unidentified factors continuing to influence forests after cessation in the evergreen forest types of the Central Highlands in Vietnam [5]. For instance, at the beginning of disturbance cessation, SCF forests retained forest structure conditions (despite strong exploitation), while LCF forests started from non-forest structure conditions. This underscores the need for in-depth research on site-specific conditions to tailor restoration strategies based on local factors (e.g., soil quality, topography).

Comparing the forest recovery status in this study with a similar context in the Dong Nai Biosphere Reserve in Vietnam, reveals significantly higher tree density (763 ± 54 trees.ha^{-1} vs. 398 ± 142 trees.ha^{-1}), despite similar total cessation duration and initial conditions [5]. In East Kalimantan, 16 years after forest exploitation, pioneer species still dominate, while late-successional species emerge as early as 10 years after fire. Protecting forests from exploitation and fire over an extended period allowed them to recover from their initial state [11]. However, the precise duration for forest recovery remains speculative without empirical evidence. There was a lightly exploited forests recover rapidly [3]. At 12 years post-exploitation, secondary forests still significantly differ from old-growth forests [13]. After 40-55 years of exploitation, secondary forests only partially recover compared to old-growth forests [22]. Another suggestion that structural recovery after exploitation may take up to 112 years, with compositional recovery requiring even more time [2]. Overall, research underscores that forest recovery capacity and extent depend significantly on their pre-exploitation state [1]. Long-term monitoring is essential to assess recovery success over extended periods.

Floristic characteristics

The survey results indicated that each plot contains an average of 31 to 43 tree species belonging to 28 to 38 genera and spanning 19 to 22 families (Tab. 4). Notably, old-growth forests exhibited the highest taxon richness, while this richness is lowest in LCF. Post-hoc LSD tests indicated that there was no significant difference between OGF and SCF in terms of species diversity. However, LCF stands out with significantly lower genera and species compared to both OGF and SCF ($p < 0.05$). At the family level, there was no statistically significant difference among forest types ($p > 0.05$). In terms of total species richness and the diversity index of forest types in the research area, the results indicate that the secondary forest types in the study area has higher species richness (28, 42) and He' (2.91, 3.17) [5]. Both SCF and LCF require more time to reach a state similar to the high peak as OGF. This is clearly reflected in the differences in the Cj index, species richness, and the number of genera between SCF and LCF when compared to OGF, with these indices having lower values for LCF.

Table 4.

Species, genera and families density of successional stages.

Successional stage	Plot No.	No of species	No. of genera	No. of families
OGF	1	48	42	25
	2	42	36	19
	3	39	35	21
	Mean±SE	43±3	38±2	22±2
SCF	1	36	35	21
	2	44	40	21
	3	39	39	23
	Mean±SE	40±2	38±2	22±1
LCF	1	28	25	17
	2	35	33	21
	3	30	26	18
	Mean±SE	31±2	28±3	19±1

The figure at Tab. 5 provides valuable insights into the composition of tree species within different forest types. In each plot, there were 3 to 7 species actively participating in the compositional formulation. Notably, OGF and LCF exhibited a higher number of dominant species involved in the compositional formulation. In these forest types, 5 to 7 species play a significant role (IV%>5%), collectively accounting for 48.7% to 63.8% of the total IV%. In

contrast, SCF had a more limited participation, with only 3 to 4 species contributing significantly. These species represented 37.6% to 57% of the total IV%.

Table 5.

Composition formula for canopy tree of three plots of three typical successional stages.

Successional stage	Plot no.	Composition formula
OGF	1	14.1 Da + 10.5 CaC + 7.5 Sc + 6.3 Dai + 5.3 Syz + 56.2 Other species
	2	12.5 Da + 11.9 CaC + 11.1 Syz + 9.0 Mim + 6.8 Syp + 5.8 Syw + 42.8 Other species
	3	14.3 CaC + 10.3 Syz + 10,1 Syp + 7.9 Mim + 7.8 Poa + 6.6 Dai + 43.1 Other species
SCF	1	24.1 Map + 15.4 Mat + 11.4 Cha + 6.2 Li + 43.0 Other species
	2	23.7 Mat + 16.8 Map + 7.9 Tr + 5.1 Cha + 46.5 Other species
	3	20.9 Map + 11.4 Cha + 5.3 Poa + 62.4 Other species
LCF	1	15.8 Ret + 15.5 Cim + 12 Pr + 8.5 Cap + 5.3 Lis + 51.3 Other species
	2	18.1 Ret + 11.2 Map + 11.0 Lis + 8.0 Pr + 6.2 Mim + 45.6 Other species
	3	12 Map + 11.5 Cha + 10.6 Cap + 9.9 El + 7.0 Pr + 6.4 Syw + 6.2 Ca + 36.2 Other species

Note: Ca*: Canthium parvifolium.,* CaC*: Calophyllum calaba,* Cap*: Castanopsis pseudoserrata,* Cha*: Choerospondias axillaris,* Cim*: Cinnamomum mairei,* Dae*: Dacrydium elatum,* Dai*: Dacrycarpus imbricatus,* El*: Elaeocarpus hygrophilus,* Li*: Litsea elongata,* Lip*: Lithocarpus silvicolarum,* Mat*: Macaranga tanarius,* Mim*: Michelia mediocris,* Poa*: Polyosma annamensis:* Map*: Machilus parviflora,* Pr*: Prunus arborea,* Ret*: Rehderodendron truongsonense,* Sc*: Schima wallichii,* Syp*: Syzygium pachysarcum,* Syw*: Syzygium wightianum,* Syz*: Syzygium zeylanicum,* Tr*: Trema angustifolia,* Da*: Dacrydium elatum.*

In OGF, the dominant species include *Calophyllum calaba, Dacrydium elatum,* and *Dacrydium elatum*, with respective IV% of 14.3%, 14.1%, and 12.5%. Additional species with IV% exceeding 10% comprise *Calophyllum calaba, Syzygium zeylanicum, and Syzygium pachysarcum*. In SCF, *Machilus parviflora* and *Macaranga tanarius* are prominent species, exhibiting remarkably high IV% values, reaching 24.1% of the total IV%. Additionally, some pioneer shade-tolerant species contribute to compositional dynamics, such as *Trema angustifolia*, *Choerospondias axillaris*, and *Litsea elongata*. In LCF are characterized by several dominant species with high IV% (ranging from 10.6%

to 18.1%). These species include *Rehderodendron truongsonense, Cinnamomum mairei, Prunus arborea, Machilus parviflora, Choerospondias axillaris, Lithocarpus silvicolarum,* and *Castanopsis pseudoserrata*. Notably, LCF also features the participation of some pioneer species from SCF, such as *Machilus parviflora* and *Choerospondias axillaris*. The figure at Tab. 6 presents the distribution of tree species and ΣG for the top 10 of prevalent families across three forest types.

Table 6.

Percentage of total high tree density and basal area of the most common families in successional stages (SCF, LCF and OGF)

Family	Secondary forests				Old-growth forests (OGF)	
	LCF		*SCF*			
	N (%)	*ΣG (%)*	*N (%)*	*ΣG (%)*	*N (%)*	*ΣG (%)*
Anacardiaceae	3.85	6.62	8.43	12.77		
Clusiaceae					17.83	9.02
Elaeocarpaceae	2.31	6.44	1.53	3.82	3.50	5.94
Escalloniaceae					4.02	3.26
Euphorbiaceae			24.14	24.61	5.24	2.36
Fabaceae	2.31	3.22				
Fagaceae	12.31	16.62	3.26	5.60		
Lauraceae	17.69	20.66	29.89	25.93	6.99	5.16
Magnoliaceae	5.00	2.75			4.02	9.95
Meliaceae			2.49	4.16		
Moraceae	3.08	1.73				
Myrtaceae					18.53	23.09
Podocarpaceae					8.92	21.35
Proteaceae			2.11	1.95		
Rosaceae	10.00	6.97				
Rubiaceae	8.46	5.32			6.99	2.28
Rutaceae			2.87	1.78		
Styracaceae	11.15	12.19	2.68	2.37		
Theaceae					6.12	7.25
Ulmaceae			4.41	4.74		

It could be stated that Elaeocarpaceae and Lauraceae demonstrate a high prevalence, ranking among the top ten families in all three forest types. In the OGF, the most abundant families in terms of tree stems were Myrtaceae (18.53%), Clusiaceae (17.83%), and Podocarpaceae (8.92%). With respect

to the sum G, Myrtaceae (23.09%), Podocarpaceae (21.35%), and Clusiaceae (9.02%) were the most dominant families. In the LCF, the Lauraceae, Fagaceae, and Styracaceae families stand out as particularly noteworthy, with individual species representing 17.69%, 12.31%, and 11.15%, respectively. The corresponding ΣG% for these families was 20.66%, 16.62%, and 12.19%. In the SCF, the three most prevalent families were Lauraceae (29.89%), Euphorbiaceae (24.14%), and Anacardiaceae (8.43%). The Lauraceae family contributed the highest value of ΣG (25.93%), followed by the Euphorbiaceae (24.61%) and Anacardiaceae (12.77%) families. The findings of this study align with those of previous research on forest plant communities in the Kon Chu Rang region [12]. The dominant tree species in secondary forests were from the families Euphorbiaceae, Lauraceae, and Magnoliaceae. In contrast, the associations of species from the families Clusiaceae and Myrtaceae in old-growth forests represent a novel discovery compared to previous studies and reports in the area (Kon Chu Rang National Reserve, 2018) [12].

The results of the species composition structure assessment at different successional stages demonstrated that the majority of research plots exhibited a dominance of three to seven species. The floristic characteristics of the successional stages of LCF were dominated by species belonging to the heliophilous, fast-growing tree group, including *Machilus parviflora, Macaranga tanarius, Litsea elongata, Clausena sp.*, and *Prunus arborea*, among others. In contrast, the dominant species in the SCF contained numerous species of shade-tolerant forest trees, such as *Rehderodendron truongsonense, Cinnamomum mairei, Castanopsis pseudoserrata, Litsea elongata, Syzygium wightianum*, and others were identified. These characteristics were consistent with the features of post-logging forests and secondary forests in Vietnam [21; 23]. In the initial successional stages of LCF, the dominant species were heliophilous trees, which colonized the bare land or small shrubby areas. In contrast, the initial successional stages of SCF were characterized by the presence of old-growth forest, which allowed for the establishment of a diverse species composition, including both heliophilous and shade-tolerant forest tree species. These differences in species composition between SCF and LCF, as well as between secondary and old-growth forests, can be attributed to the distinct initial successional characteristics of each state. It should be noted that the recovery rates of the two forest states, SCF and LCF, also differ. Despite the comparable cessation period of 30 years, the recovery rate in terms of biodiversity does not exhibit a significant discrepancy between the two subjects. However, the SCF forest type demonstrates a more rapid recovery in terms of tree and family number

compared to LCF when OGF is considered as the climax forest (Tab. 3 and Tab. 6). These findings were consistent with those reported for the Hainan forest and Costa Rica [9; 18].

Conclusion

Our findings indicated that continuous NDVI values serve as a suitable indicator for classifying forest successional stages, with a threshold value of 0.7. The structural anddiversity characteristics of the three typical successional satges exhibited notable variation. The tree density ranged from 347 to 763 stems per hectare, while the total basal area varied from 15.5 to 42.8 m² per hectare, with significant differences among them ($p < 0.05$). A decreasing trend in tree density distribution by DBH class was observed across all forest types. However, the OGF exhibited the highest tree density and basal area for DBH classes larger than 25 cm. The diversity of the old-growth forest was significantly higher than that of the two secondary forests. This is attributed mainly to the duration of restoration and the initial state at the beginning of disturbance cessation. A total of 31 to 43 tree species, belonging to 28 to 38 genera and spanning 19 to 22 families, were identified. The lowest species richness was observed in the LCF. Three to seven species were identified as actively contributing to the compositional structure. In the LCF, dominant tree species were heliophilous and fast-growing, whereas in the SCF, they were shade-tolerant. Of note, the associations of the species belong to Clusiaceae and Myrtaceae in old-growth forests represented a novel finding compared to previous studies in the research area. Long-term monitoring and research are crucial to assess recovery success over extended periods.

Conflict of interest information. No potential conflict of interest was reported by the author(s).

Sponsorship information. The work was carried out within of the topic "Research on natural forest restoration solutions based on landscape approach at Kon Ha Nung plateau biosphere reserve, Gia Lai province" in Vietnam, Joint Vietnam-Russian Tropical Science and Technology Research Center.

Acknowledgements. We thank the management board of the Kon Chu Rang natural reserve for support during our research. We thank Dr. Luong Van Dung from Faculty of Biology, Dalat University, Msc. Hoang Thanh Son from Silviculture Research Institute, Vietnam Academy of Forest Sciences and Dr. Do Van Hai from Department of Botany and the Institute of Ecology and Biological Resources for identifying plant species in the field.

Referrences

1. Bischoff, W., Newbery, D. M., Lingenfelder, M., Schnaeckel, R., Petol, G. H., Madani, L., & Ridsdale, C. E. (2005). Secondary succession and dipterocarp recruitment in Bornean rain forest after logging. *Forest Ecology and Management*, *218*(1–3), 174–192. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.07.009
2. Bonnell, T. R., Reyna-Hurtado, R., & Chapman, C. A. (2011). Post-logging recovery time is longer than expected in an East African tropical forest. *Forest Ecology and Management*, *261*, 855–864. https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2010.12.016
3. Chazdon, R. L. (2003). Tropical forest recovery: Legacies of human impact and natural disturbances. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, *6*(1–2), 51–71. https://doi.org/10.1078/1433-8319-00042
4. Con, T. V. (2015). *Research on integrated solutions to restore and manage watershed protection forest systems in the Central Highlands*. Vietnam Academy of Forest Sciences. Ha Noi.
5. Dong, T. L. (2019). *Research to evaluate the succession of forest ecosystem restoration and propose conservation solutions in Dong Nai Biosphere Reserve*. Vietnam Academy of Forest Sciences. Ha Noi.
6. Falkowski, M. J., Evans, J. S., Martinuzzi, S., Gessler, P. E., & Hudak, A. T. (2009). Characterizing forest succession with LiDAR data: An evaluation for the inland Northwest, USA. *Remote Sensing of Environment*, *113*(5), 946–956. https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.01.003
7. Hang, T., Huong, T., Son, P., & Khai, N. (2023). Application of Delphi method to identify sustainable university assessment criteria for Vietnam. *VNU Journal of Science: Earth and Environmental Sciences*, *39*(1), 16–27. https://doi.org/10.25073/2588-1094/vnuees.4790. EDN: https://elibrary.ru/PYAPGA
8. Hoi, N. D., Dung, N. T., & Cuong, D. H. (2021). Transformation and ecological succession of natural-anthropogenic landscapes in Konkakinh-Konchurang conservation territory, Vietnam. *Environmental Science, Geography*, *3*(11), 52–71. https://doi.org/10.21072/eco.2021.03.01
9. Kalacska, M., Sanchez-Azofeifa, G. A., Calvo-Alvarado, J., Quesada, M., Rivard, B., & Janzen, D. (2004). Species composition, similarity and diversity in three successional stages of a seasonally dry tropical forest. *Forest Ecology and Management*, *200*, 227–247. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.07.001
10. Kerkhoff, J. A. (2010). *Measuring biodiversity of ecological communities*. Retrieved from http://biology.kenyon.edu/courses/biol229/diversity.pdf

11. Kiswanto, Setiawati, M. D., Wahyulianto, I., & Tsuyuki, S. (2022). Tracking transitions of tropical deforestation in East Kalimantan, Indonesia using time-series Landsat images from 2000 to 2016. In M. Rani Chaudhary, B. S., Jamal, S., & Kumar, P. (Eds.), *Towards sustainable natural resources*. Springer.
12. *KonKaKinh National Park: Forest management and protection at Kon Ka Kinh National Park, Gia Lai Province* (2019). Gia Lai Province, Viet Nam.
13. Kuusipalo, J., Jafarsidik, Y., Ådjers, G., & Tuomela, K. (1996). Population dynamics of tree seedlings in a mixed dipterocarp rainforest before and after logging and crown liberation. *Forest Ecology and Management*, *81*, 85–94. https://doi.org/10.1016/0378-1127(95)03654-7. EDN: https://elibrary.ru/ANRFOF
14. Magurran, A. E. (2021). Measuring biological diversity. *Current Biology*, *31*(19), R1174–R1177. https://doi.org/10.1016/j.cub.2021.07.049. EDN: https://elibrary.ru/BNQNZF
15. MARD. (2021). *Announcement on the current state of forests nationwide in 2020* (Decision No. 1558/QD-BNN-TCLN). Ha Noi, Viet Nam.
16. Martinuzzi, S., Gould, W. A., Vierling, L. A., Hudak, A. T., Nelson, R. F., & Evans, J. S. (2012). Quantifying tropical dry forest type and succession: Substantial improvement with LiDAR. *Biotropica*, *45*, 135–146. https://doi.org/10.1111/j.1744-7429.2012.00904.x
17. McDonald, T., George, D. G., Justin, J., Kingsley, W. D., James, A., Kris, D. R., James, G. H., et al. (2016). *International standards for the practice of ecological restoration — Including principles and key concepts*. Society for Ecological Restoration. Washington, D.C.
18. Meng, J., Lu, Y., Lei, X., & Liu, G. (2011). Structure and floristics of tropical forests and their implications for restoration of degraded forests of China's Hainan Island. *Tropical Ecology*, *52*(2), 177–191.
19. Newton, A. (2007). *Forest ecology and conservation: A handbook of techniques. Techniques in ecology & conservation*. Oxford Academic. https://doi.org/10.1093/acprof. EDN: https://elibrary.ru/UVIJKB
20. Okuda, T., Suzuki, M., Adachi, N., Quah, E. S., Hussein, N. A., & Manokaran, N. (2003). Effect of selective logging on canopy and stand structure and tree species composition in a lowland dipterocarp forest in Peninsular Malaysia. *Forest Ecology and Management*, *175*, 297–320. https://doi.org/10.1016/S0378-1127(02)00137-8. EDN: https://elibrary.ru/BDOQMX
21. Phuc, L. V., Thoa, N. T., Cuong, N. D., & Thong, V. V. (2020). Characteristics of forest vegetation types in Quang Ninh Province. *Forestry Science and Technology*, *2*, 68–77.

22. Shima, K., Yamada, T., Okuda, T., Fletcher, C., & Kassim, A. R. (2018). Dynamics of tree species diversity in unlogged and selectively logged Malaysian forests. *Scientific Reports*, *8*, 1028. https://doi.org/10.1038/s41598-018-19250-z. EDN: https://elibrary.ru/KMAMHO
23. Trung, P. D., Dong, T. L., Tuyet, P. Q., Khuong, N. V., Phuong, N. T. T., & Quy, T. H. (2016). Structure and biodiversity of timber layer of logged-over forests in the Dong Nai Culture and Nature Reserve. *Vietnam Journal of Forest Science*, *4*, 4637–4645.
24. Trung, T. V. (1999). *Forest vegetation of Vietnam*. Ha Noi, Viet Nam: Science and Technology Publishing House.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Tran T.T. Huong: Formation of the idea and development of objectives, its critical revision with the introduction of valuable comments of intellectual content, final approval of the manuscript for publication.

Nguyen D. Hoi: Preparation and approval of the final version of the article.

Dang H. Cuong: Data collection, interpretation of the results obtained, application of statictical for the analysis research data.

Nguyen T. Minh: Data collection, interpretation of the results obtained, mathematical computational methods for the analysis of GIS data, drafting the manuscript.

DATA ABOUT THE AUTHORS

Tran T.T. Huong, Cand. Sc. (Silviculture), Junior Researcher
Joint Vietnam-Russian Tropical Science and Technology Research Center
Nguyen Van Huyen Str., Nghia Do, Cau Giay, Hanoi, Vietnam
thanhhuongfuv@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0009-0003-7555-9212

Nguyen D. Hoi, Cand. Sc. (Geography), Institute of Tropical Ecology, Director
Joint Vietnam-Russian Tropical Science and Technology Research Center
Nguyen Van Huyen Str., Nghia Do, Cau Giay, Hanoi, Vietnam
danghoi110@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6832-283X

Dang H. Cuong, Cand. Sc. (Ecology), Junior Researcher
Joint Vietnam-Russian Tropical Science and Technology Research Center
Nguyen Van Huyen Str., Nghia Do, Cau Giay, Hanoi, Vietnam

danghungcuong@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1208-737X

Nguyen T. Minh, Lecturer, Faculty of Forestry, Dr. Agriculture of Science
Vietnam National University of Forestry
Xuan Mai, Chuong My, Hanoi, Vietnam
minhnguyen1408@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0009-0000-1911-601X

Поступила 07.11.2024
После рецензирования 02.12.2024
Принята 10.02.2025

Received 07.11.2024
Revised 02.12.2024
Accepted 10.02.2025

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-4-1305 **EDN: WPQJQP**
УДК 630.8

Научная статья

МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СОВРЕМЕННОГО ЛЕСОПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ КАК ОСНОВА УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ

С.О. Медведев, А.К. Назарова

Аннотация

Обоснование. Лесная промышленность является одной из перспективных в структуре экономики страны. Для ее качественной трансформации необходимы разработка и внедрение на предприятиях отрасли стратегий и моделей развития, отвечающих современным требованиям. Мировая практика и научные разработки указывают на необходимость перехода на принципы устойчивого развития. В связи с этим модели функционирования современных лесопромышленных предприятий должны учитывать комплекс факторов, связанных с экономикой, экологией и социальной сферой.

Цель. Анализ особенностей развития предприятий лесной промышленности в современных условиях и разработка модели их устойчивого развития.

Материалы и методы. Исследование опирается на труды отечественных и зарубежных ученых, статистические данные о производственной деятельности российских лесопромышленных предприятий, экспертные мнения в части современного мнения развития отрасли. Обработка данных выполнялась с помощью программ Microsoft Office. Прогнозирование выполнялось с помощь метода экспоненциального сглаживания.

Результаты. В результате проведенного исследования модель развития лесопромышленного предприятия. Ее ключевыми элементами являются четыре структуры: экономическая, производственная, экологическая и инновационная. Важным аспектом в развитии предприятий отрасли определена необходимость устойчивого развития. С помощь метода экспоненциального сглаживания получены прогнозные модели изменения производственных показателей предприятий отрасли. Полученные результаты отличаются новизной и могут быть использованы как с теоретической, так и прикладной точек зрения.

Заключение. Исследование подтвердило гипотезу о важности моделирования деятельности предприятиями лесной промышленности, при этом ключевое значение для конкурентоспособности в ближайшей перспективе будет иметь ориентация на устойчивое развитие.

Ключевые слова: лесная промышленность; устойчивое развитие; моделирование; прогнозирование; охрана окружающей среды; инновации

Для цитирования. Медведев, С. О., & Назарова, А. К. (2025). Модель функционирования современного лесопромышленного предприятия как основа устойчивого развития. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(4), 362-382. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-4-1305

Original article

THE MODEL OF FUNCTIONING OF A MODERN TIMBER INDUSTRY ENTERPRISE AS A BASIS FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT

S.O. Medvedev, A.K. Nazarova

Abstract

Background. The forestry industry is one of the most promising in the structure of the country's economy. For its qualitative transformation, it is necessary to develop and implement development strategies and models at industry enterprises that meet modern requirements. World practice and scientific developments point to the need to adopt the principles of sustainable development. In this regard, the models of functioning of modern timber enterprises should take into account a complex of factors related to the economy, ecology and the social sphere.

Purpose. The analysis of the peculiarities of the development of enterprises of the forest industry in modern conditions and the development of a model of their sustainable development.

Materials and methods. The research is based on the works of domestic and foreign scientists, statistical data on the production activities of Russian timber enterprises, and expert opinions regarding the current opinion on the development of the industry. Data processing was performed using Microsoft Office programs. The prediction was performed using the exponential smoothing method.

Results. As a result of the conducted research, the model of development of a timber industry enterprise. Its key elements are four structures: economic, industrial, environmental and innovative. An important aspect in the development of industry

enterprises is the need for sustainable development. Using the exponential smoothing method, predictive models of changes in production indicators of industry enterprises were obtained. The results obtained are new and can be used from both theoretical and applied points of view.

Conclusion. The study confirmed the hypothesis about the importance of modeling the activities of enterprises in the forestry industry, while focusing on sustainable development will be key to competitiveness in the near future.

Keywords: forestry industry; sustainable development; modeling; forecasting; environmental protection; innovation

For citation. Medvedev, S. O., & Nazarova, A. K. (2025). The model of functioning of a modern timber industry enterprise as a basis for sustainable development. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(4), 362-382. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-4-1305

Введение

В настоящее время лесная промышленность переживает кардинальные изменения. Прежде всего, такое положение дел обуславливается стремительным научно-техническим прогрессом. Вместе с тем изменяются потребительские предпочтения в сторону новых, доступных материалов. Экологическая эффективность производства становится важной, хоть и не настолько как экономические показатели (например, рентабельность предприятия). Сегодня устойчивое развитие предприятия – это не просто теоретический предмет, а практическое направление, которому следуют многие крупные предприятия во всем мире [8]. К лесным ресурсам все время выдвигаются новые требования, предпринимаются новые оценочные критерии, на основании которых можно установить степень доступности для освоения промышленности. В рыночной среде, которая постоянно меняется, каждое предприятие обязательно должно иметь модель развития, чтобы адаптироваться к новым условиям [5; 14]. Говоря о лесной промышленности, отметим, что многочисленные процессы здесь сопряжены с планированием на долгосрочную перспективу, со стабильным применением природных ресурсов. Данный факт обусловлен уникальными характеристиками древесины. Это восстанавливаемый ресурс. Однако многие породы (особенно ценные для промышленности – сосна, лиственница, ель, кедр и т.д.) имеют очень длительный период роста (в отдельных случаях 80-100 лет). Вот почему применение конкретной модели развития – это актуальная задача для предприятий отрасли. Прежде всего, с помощью модели можно значительно повысить эффективность деятельности субъекта

хозяйствования, гарантировать экономическую стабильность собственников, экологическую безопасность.

В рамках данной работы были исследованы отдельные возможные подходы к моделированию развития предприятий лесной промышленности. При этом данная отрасль неразрывно связана с охраной окружающей среды. Чтобы последовательно и корректно оценивать работу лесопромышленного предприятия, необходимо наличие у него определённой модели развития, в рамках которой систематизированы и структурированы внутренние процессы. Благодаря такому подходу удается установить базовые факторы успеха, оптимизировать ресурсную базу, а значит, строго достигать поставленных целей.

Цель исследования – проанализировать особенности развития предприятий лесной промышленности в современных условиях и разработать модель их устойчивого развития.

Материалы и методы

Работа построена на трудах зарубежных и отечественных авторов, которые углубленно занимались изучением вопросов моделирования в развитии компаний, оптимизации процессов производства, устойчивого использования ресурсов.

В качестве методов исследования применились классические инструменты: анализ, синтез, обобщение, моделирование и т.д. В целях получения объективной информации о современном состоянии предприятий лесной отрасли использовалась статистическая обработка данных. Для изучения отдельных аспектов исследования были привлечены эксперты (представители крупнейших лесопромышленных предприятий страны и научно-исследовательских организаций). Также использованы методы прогнозирования (в работе представлены результаты, полученные с помощью экспоненциального сглаживания).

Информационная база исследования: официальная отчетность, содержащаяся в единой межведомственной информационно-статистической системе (ЕМИСС), а также на сайте Федеральной службы по надзору в сфере природопользования. Обработка данных выполнялась с помощью пакета прикладных программ Statistica 10.0 и Microsoft Office Excel.

Результаты

В ходе исследования была проанализирована статистическая информация о состоянии лесной промышленности в целом. Отдельные из исследованных показателей представлены в табл. 1.

Таблица 1.

Объем производства основных видов продукции лесной промышленности России за 2017-2023 гг.

Вид продукции	Год						
	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Лесоматериалы необработанные, млн. плотн. м^3	134,40	145,22	141,16	140,00	145,16	134,21	125,76
Древесина топливная, млн. плотн. м^3	14,71	14,79	13,32	12,85	12,96	11,57	10,34
Плиты древесно-стружечные, млн. усл.м^3	8,47	9,75	9,99	9,86	11,42	10,32	11,60
Плиты древесно-волокнистые материалов, млн.усл.м^2	590,53	649,30	682,33	642,48	740,04	649,48	703,32
Гранулы топливные (пеллеты), тыс.тонн	1 343,5	1 409,9	1 635,6	1 996,8	2 378,7	2 073,4	1 456,1
Брикеты топливные, тыс.тонн	80,9	100,0	160,1	164,4	177,6	206,7	180,1
Целлюлоза древесная, млн.тонн	8,59	8,58	8,25	8,77	8,83	8,77	8,55
Бумага и картон млн.тонн	8,57	9,06	9,13	9,54	10,37	10,05	10,01
Фанера, млн.м^3	3,73	4,02	4,08	4,01	4,48	3,24	3,26
Лесоматериалы, млн.м^3	25,88	26,05	29,85	28,64	30,15	28,99	28,49

Все производимые товары имеют устойчивую тенденцию к росту до 2022 года, после которого наблюдаются падения объемов производства большей части продукции лесопромышленного комплекса. Это во многом обусловлено санкционными ограничениями и комплексом сопутствующих проблем, коснувшихся всей экономики России.

Лесная отрасль традиционно относится к чувствительным в вопросах экологии и охраны окружающей среды [3]. Это обусловлено и ролью лесов в углеродном балансе, очистке воздуха и комплексом вопросов лесохозяйственного направления (пожары, лесные вредители, влияние на почвы, реки, живые организмы и т.д.). По этой причине деятельность лесной промышленности сопряжена с решением важных экологических вопросов. А планирование деятельности, выстраивание стратегий и моделей развития как отдельных предприятий, так и всего лесопромышленного комплекса – сложная, но крайне важная и необходимая задача.

В результате проведенного исследования установлено, что предприятия лесной промышленности сталкиваются в современных условиях с колоссальными трудностями: неэффективное использование ресурсов, низкая оптимизация логистики, применение устаревших технологий, экологические проблемы [17]. Однако стратегическое планирование и

выстраивание четкой и выстроенной модели развития ведет к тому, что значительная часть существующих проблем может получить если не решение в короткий промежуток времени, то четкий план устранения [15]. Кроме этого, моделирование обеспечит более точный прогноз относительно потребностей, оптимизацию процессов, внедрение инноваций в производственный процесс и стратегии устойчивого развития [13].

Под моделью развития лесопромышленного предприятия необходимо рассматривать концепцию стратегического плана, в рамках которой описаны механизмы, а также пути достижения стабильного роста компании в условиях изменяющейся внешней среды. На рисунке 1 представлена общая модель развития лесопромышленного предприятия. Она представляет собой комплексную схему, посредством которой нормализуются базовые аспекты работы субъекта хозяйствования. Каждый компонент внутри модели вступает во взаимодействие друг с другом.

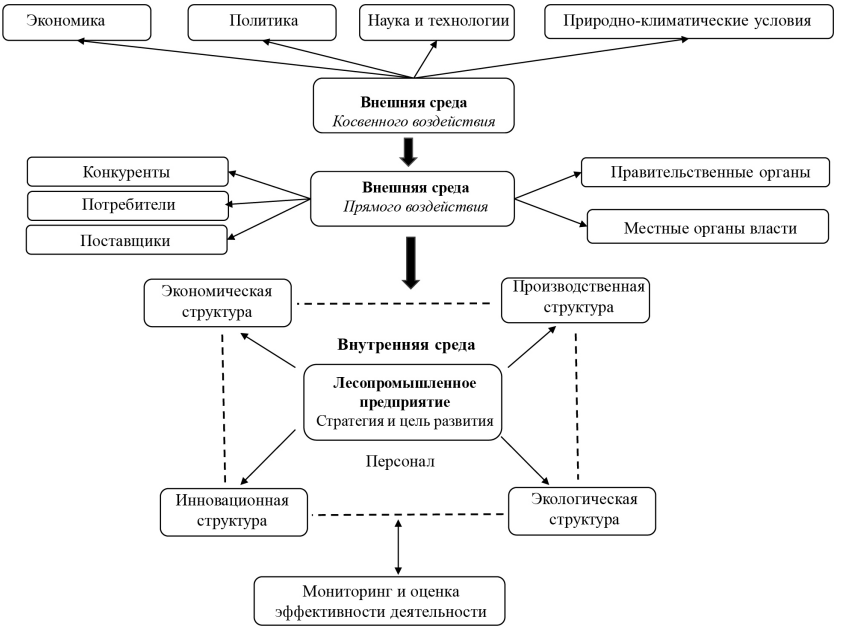


Рис. 1. Модель развития лесопромышленного предприятия

В представленной модели центральное место занимает лесопромышленное предприятие. Крайне важно, чтобы предприятие имело конкретную

цель развития, стратегические ориентиры. Что касается стратегии, то она предусматривает под собой конкретные действия, которые будут направлены на достижение долгосрочных целей: увеличение уровня производительности, инновационное развитие, повышение качества выпускаемой продукции, рациональное использование ресурсов. Под последними, прежде всего, понимается древесное сырье [14]. Однако в современных условиях лесная промышленность – это конкурентный бизнес, где рационально необходимо подходить к использованию абсолютно всех ресурсов (материальных, трудовых, финансовых и т.д.). В рамках цели развития установлены ориентиры, которые необходимо стремиться достичь, например: наращивание прибыли, расширение рыночной доли, снижение воздействия на окружающую среду. Работа, направленная на реализацию стратегии субъекта хозяйствования, берёт своё начало с анализа положения бизнеса в данный момент, далее определяются приоритетные направления, прорабатывается план дальнейших действий. При этом стратегия должна характеризоваться гибкостью, чтобы быстро реагировать на изменения извне. Эффективной интеграции стратегии способствует вовлечение в дело всех работников предприятия: от высшего руководства до рядовых сотрудников. После чего предстоит на постоянной основе контролировать выполнение поставленных задач и, при необходимости, корректировать их. Вовлечение персонала промышленного предприятия в достижение различных целей (не только экономических) является крайне сложной задачей. Это обусловлено рядом причин: чрезмерно большая численность персонала; «ограниченность» целей сотрудников финансовым вознаграждением за труд; преобладание персонала, занятого физическим трудом; слабая вовлеченность персонала в принятие решений и организацию производственных процессов предприятий и т.д. Тем не менее, как было выявлено в ходе исследования, отдельные успешные практики вовлечения персонала в достижение неэкономических показателей лесопромышленных предприятий существуют [1; 2]. Необходимо отметить, что значительная часть таких бизнес-структур отмечается современными подходами к бизнесу и активным внедрением различных инноваций в производство.

На представленном рис. 1 выделены следующие структуры: производственная, экономическая, экологическая и инновационная. Каждый компонент является частью внутренней среды, так как напрямую воздействует на развитие, функционирование субъекта хозяйствования в рыночных условиях. Благодаря ним предприятие получает нужные ресурсы, потенциал роста, конкурентные преимущества. Вместе с тем, каждая из выделенных

структур требует детального рассмотрения в целях формирования и понимания деталей представленной авторской модели.

Рассматривая экономическую структуру предприятия лесной промышленности, необходимо отметить, что она представляет собой управленческую систему, где объектом управления являются материальные и финансовые ресурсы. Благодаря этой данному элементу модели на предприятии формируется прибыль, обеспечивается устойчивость функционирования в конкурентной среде. Она охватывает такие компоненты, как управление расходами и доходами, планирование и бюджетирование, анализ финансовой деятельности. На рисунке 2 представлены функции, входящие в состав экономической структуры.



Рис. 2. Ключевые функции и направления оценки экономической структуры лесопромышленного предприятия

Для того чтобы практически реализовать экономическую структуру, необходимо задействовать современные методы финансового менеджмента, использовать автоматизацию учета, мониторинг финансов, применение программных решений для анализа информации и т.д.

На лесопромышленном предприятии экономическая структура может быть оценена на основании финансового анализа, где рассматривается ликвидность и рентабельность, оборачиваемость активов. Кроме прочего, исследуется характер управления расходами (структура затрат, анализ себестоимости продукции и т.п.) [12]. Также определяется эффективность применения ресурсов, мощностей производства. Для оценки экономической структуры используются показатели финансовой отчетности, аналитические системы, бенчмаркинг. Эффективная экономика базируется на разумном использовании имеющихся ресурсов и призвана достигать стабильности в финансовом направлении.



Рис. 3. Показатели, применяемые для оценки производственной структуры лесопромышленного предприятия

Производственная структура лесопромышленного предприятия представляет собой выстроенные процессы производства, от заготовки и переработки древесины, до выпуска готовой продукции. Этот элемент модели связан с технологиями и оборудованием, ресурсами, рабочей силой, которые будут задействованы в процессе достижения поставленных целей. Производственная структура является важнейшим компонентом для ор-

ганизации, планирования, контроля операций на производстве, оптимизации загрузки мощностей и повышения эффективности работы в целом. С помощью показателей, приведённых на рисунке 3, можно оценить структуру производства.

Как правило, для оценки применяются параметры отчётности компании, анализ себестоимости продукции. За счёт эффективной структуры производства обеспечивается высокая производительность, снижение расходов и минимизация отходов производства. Внедрение инноваций в структуру производства – это мероприятия, которые дают возможность улучшить процессы работы компании.



Рис. 4. Показатели, применяемые для оценки инновационной структуры лесопромышленного предприятия

Говоря об инновационной структуре лесопромышленного предприятия, необходимо отметить, что она представляет собой комплекс ресурсов, процессов, а также механизмов, которые направлены на интеграцию новых товаров, технологий, достижение стабильности в развитии бизнеса. В составе инновационной структуры можно выделить конструкторские

и исследовательские наработки, передовые технологии, обучение персонала и многое другое. На основании инновационной структуры можно модернизировать производственные мощности. Для этого необходимо разрабатывать стратегию инвестирования, сотрудничества с партнерами, научными центрами и т.д. Показатели, с применением которых оценивается инновационная структура, приведены на рисунке 4.

Чтобы провести качественное исследование инновационной составляющей деятельности промышленных предприятий, применяются данные по итогам НИОКР, финансовые отчёты, параметры качества продукции [16]. Происходит сравнение с конкурентами, средними показателями по отрасли, а также данными за предыдущие периоды деятельности. Практика показывает, что благодаря эффективной инновационной структуре лесопромышленное предприятие может понизить издержки, повысить эффективность и сформировать устойчивое конкурентное преимущество [4; 11].

Лесная промышленность, где осуществляются комплексные технологические операции по заготовке леса, обработке лесоматериалов и производству деревянных или бумажных изделий, сталкивается с проблемами, требующими бережного отношения к окружающей среде. Деятельность предприятий отрасли сопряжена с вырубкой лесов, использованием различных химических реагентов и веществ, образованием отходов, сбросов, выбросов и иных воздействий. Значительная часть из них опасны как для населения, так и для природы в целом [7; 10]. Современные зарубежные лесопромышленные предприятия, ориентируясь на устойчивое развитие, уделяют важнейшее внимание в своей деятельности минимизации воздействия на окружающую среду. Отечественный бизнес в средне- и долгосрочной перспективе также должен придти к сочетанию технологий, мероприятий и подходов для снижения негативного воздействия производства на экологию.

Экологическая компонента в представленной на рис. 1 модели используется в целях выполнения нормативных требований в сфере охраны и защиты окружающей среды, улучшения экологической ответственности предприятия, а также снижения многочисленных экологических рисков. В рамках реализации экологической структуры предусматривается проработка экологической политики, интеграция технологий по сбережению ресурсов, вторичное использование сырья и материалов (прежде всего древесного происхождения). Не менее важным компонентом считается связь с общественными и государственными учреждениями в целях решения рассматриваемых проблем. На рисунке 5 представлены показате-

ли, на основании которых может быть выполнена оценка экологической структуры лесопромышленного предприятия.

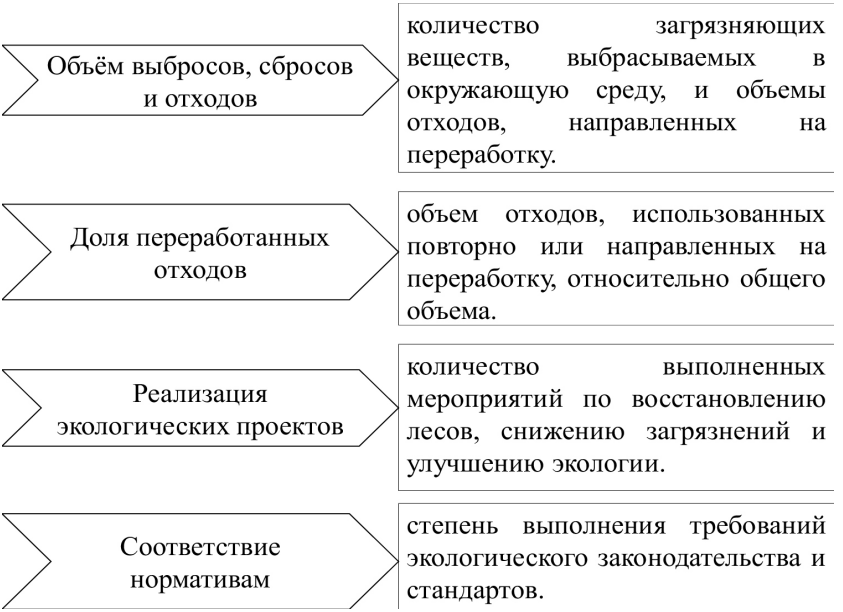


Рис. 5. Показатели, применяемые для оценки экологической структуры лесопромышленного предприятия

В современных реалиях, когда роль ответственного бизнеса возрастает, благодаря эффективной экологической структуре можно не просто понизить негативное воздействие на окружающую среду, но улучшить позиции на рынке.

Предприятия должны не только эффективно развивать производство, но и принимать на себя ответственность за улучшение условий труда. Персонал, в конечном итоге, участвует в создании продукции лесопромышленных предприятий. Без него не возможна организация производства. В таком случае важнейшим фактором успеха предприятий является персонал. При этом его деятельность, в свою очередь, сопряжена с производственной, экономической, инновационной, а также экологической составляющей предприятия лесной промышленности. Все они оказывают воздействие на условия труда, вовлеченность, мотивацию и удовлетворенность сотрудников. Существует очень много аспектов социального

эффекта, которые не могут быть измерены напрямую или даже косвенно. Следовательно, можно только опираться на качественные параметры. В рамках таких показателей принимают во внимание улучшение бытовых, коммунальных условий труда, понижение количества ручного труда, увеличение прибыли на одного сотрудника. Премирование, уровень зарплаты, социальные гарантии – все это находится в зависимости от экономической эффективности бизнеса. Имея стабильное финансовое состояние, компания может вкладывать средства в улучшение условий труда, обучать персонал, повышая его лояльность к компании. В рамках организации процессов производства определяется психологическая, а также физическая нагрузка на персонал. Автоматизация труда, оптимизация структуры производства сводят к минимуму трудные, рутинные операции. Вместе с тем, растет безопасность производства, комфорт на рабочем месте. Интеграция новых технологий предусматривает обучение персонала, за счёт чего развиваются его навыки, повышается квалификация. Параллельно совершенствуются техника и оборудование, на котором качественно может трудиться повысивший квалификацию персонал. При активном участии в реализации инновационных проектов, наблюдается профессиональный рост. Совершенствуется корпоративная культура. Привлечение персонала к экологическим инициативам, реализация программ экологической направленности – все это вырабатывает чувство ответственности за природу. Стабильное развитие компании повышает репутацию, а значит, бизнес становится привлекательным, как для действующих сотрудников, так и для потенциальных. Таким образом, социальный фактор играет важную роль в эффективной работе каждой структуры.

Заключительный этап модели развития лесопромышленного предприятия – оценка и мониторинг эффективности работы всех его структур. Здесь проводятся анализ, мониторинг и оценка итогов работы предприятия. Данный элемент модели может быть использован в целях определения отклонений в работе предприятия от плановых показателей, оптимизации ресурсной базы, принятия решений управленческого характера и т.д. Эффективность оценивается посредством метода финансовых коэффициентов, сравнительного анализа, с применением программного моделирования. Успешный мониторинг и оценка деятельности обеспечивают контроль текущей работы предприятия, позволяют планировать долгосрочное развитие, снижая риски и повышая конкурентоспособность.

Помимо внутреннего мониторинга и оценки деятельности лесопромышленного предприятия, различные аспекты его работы анализируются

различными внешними структурами. При этом цели таких исследований чрезвычайно дифференцированы. При этом внешнее окружение предприятия колоссальным образом воздействует на его внутреннюю среду, формируя условия для его функционирования и развития. Внешняя среда затрагивает политические, экономические, технологические, социальные и многие другие аспекты [6; 9]. Среди факторов внешней среды наиболее интересны для оценки для развития лесопромышленного предприятия те, что оказываются прямое воздействие. Вполне очевидно, что потребители, конкуренты, поставщики оказывают колоссальное воздействие на работу предприятий отрасли.

Конкуренты – это соперники, действия которых могут стимулировать развитие предприятия или угрожать его развитию. Чтобы оценить конкурентную среду, необходимо проанализировать сильные и слабые стороны конкурентов, стратегии, актуальные позиции на рынке. Это помогает разработать стратегии конкурентной борьбы и улучшить свою долю на рынке. Применительно к лесной отрасли наибольшая конкуренция (большее число предприятий) наблюдается в сфере обработки и заготовки древесины. По мере усложнения технологий число действующих предприятий сокращается. Это приводит к тому, что в наиболее экологически чувствительных и опасных направлениях, конкуренция ведется между ограниченным числом компаний.

Не менее важный компонент внешнего окружения – поставщики, которые отвечают за поставки материалов, сырья. На предприятии лесной промышленности речь идет о поставках древесины, прочих материалов вспомогательного сегмента, которые определяют качество конечной продукции. Выстраивание эффективных связей с поставщиками даёт возможность снизить расходы, оптимизировать производственные процессы.

Таким образом, представленная модель развития предприятия направлена на то, чтобы достигать сбалансированной работы, с учетом интересов сотрудников, собственников, общества и государства. При реализации заявленной модели компания оптимизирует внутренние процессы, развивает и внедряет новые технологии, соблюдая экологические стандарты. Это должно приводить к эффективному управлению ресурсной базой, повышению уровня финансовой стабильности и качества продукции, снижению негативного влияния на окружающую среду.

Основываясь на представленной модели, оценках ее ключевых компонент экспертным методом, а также используя метод экспоненциального сглаживания, были получены прогнозные значения для деятельности

лесной промышленности России на период до 2035 года. Полученные данные были разделены на три ключевые варианта: оптимистический, пессимистический и реальный. Необходимо отметить, что получаемые сценарии развития в целом имеют положительную динамику. По всем ключевым направлениям деятельности отечественного ЛПК получены увеличения объемов производства. При этом пессимистический сценарий предполагает минимальный прирост производственных показателей, оптимистический – свидетельствует о существенном развитии (при крайне благоприятном сочетании действия факторов внешней среды), реалистический – указывает на значительный прирост большей части производств. Вместе с тем, для развития отрасли крайне важное значение имеет наличие сырья, зависящее в значительной степени от объемов лесозаготовок. Для данного показателя также получена прогнозная модель по трем сценариям (рис. 6).



Рис. 6. Прогнозная модель объемов лесозаготовок в России на период до 2035 года, млн. м^3 по трем сценариям (реалистический, пессимистический и оптимистический)

Одним из важных элементов разработанной в проведенном исследовании модели является разумное сочетания экологических, экономических и социальных аспектов деятельности лесопромышленных предприятий. В упрощенном смысле это устойчивое развитие бизнеса. Для лесной отрасли, по мнению многих экспертов, одним из важных проявлений в данном направлении является максимально полное использование древесных ресурсов, то есть вовлечение в производство отходов. Согласно статистическим данным, объем образующихся отходов на предприятиях отрасли в последние годы неуклонно снижается. В совокупности с наращиванием

объемов выпуска, это свидетельствует о все большем вовлечении в производство вторичных древесных ресурсов. Данный факт подтверждает тезис о том, что предприятия лесной промышленности России движутся в направлении устойчивого развития.

Заключение

В результате проведенного исследования установлено, что успешная работа предприятий лесной промышленности на данный момент не представляется возможной без принятия во внимание ряда факторов, связанных между собой: экология, экономика, производство, социальная ответственность, инновационное развитие. Модель развития, которой придерживается предприятие, должна быть адаптируемой под изменяющиеся условия внешней среды. Однако необходимо понимать, что стратегическое перестроение предприятий отрасли требует значительного времени. Для стабильного развития необходимо последовательно внедрять новые подходы и технологии. При этом в текущих сложных экономических условиях государственная поддержка играет значительную роль, включая создание соответствующей современным реалиям нормативно-правовой базы, стимулирование инвестиций в инновации и экологически чистые технологии.

На уровне лесопромышленного предприятия ключевая задача состоит в перестройке бизнес-процессов. Сбалансированная стратегия, которая предусматривает экономическую, экологическую, социальную составляющую, даёт возможность решить множество существующих проблем, гарантировать процветание с созданием особых ценностей для общества без вреда экологии. Такова общая направленность устойчивого развития, которое постепенно реализуется в отечественных отраслях промышленности. Представленная модель развития лесопромышленного предприятия – универсальная, поэтому её можно успешно интегрировать в предприятия всех регионов страны, принимая во внимание местные условия, особенности управления.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация о спонсорстве. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-78-10002, https://rscf.ru/project/22-78-10002/.

Список литературы

1. Афанасьев, А. С., & Киселёва, И. Г. (2019). Внедрение грейдинга в систему оплаты труда персонала на лесопромышленном предприятии. *Труды Брат-*

ского государственного университета. Серия: Экономика и управление, *1*, 79–83. EDN: https://elibrary.ru/DQHCIS

2. Зотина, П. С. (2021). Мотивация персонала как фактор инновационного развития лесопромышленных кластеров. *Экономика и управление: проблемы, решения*, *4*(10), 130–134. https://doi.org/10.36871/ek.up.p.r.2021.10.04.017. EDN: https://elibrary.ru/LRVDEF
3. Кожухов, Н. И. (2014). Сбалансированное развитие отраслей лесного сектора в системе регионального экономического пространства. *Вестник Московского государственного университета леса — Лесной вестник*, *18*(3), 18–23. EDN: https://elibrary.ru/SFNIIR
4. Корелин, В. В., & Попов, Н. Л. (2019). Развитие современных технологий и внедрение инноваций на предприятиях лесопромышленного комплекса. *Известия Санкт-Петербургского государственного экономического университета*, *6*(120), 95–98. EDN: https://elibrary.ru/CZLHZB
5. Коряков, А. Г. (2012). Методические подходы к моделированию устойчивого развития промышленных предприятий. *Вестник экономики, права и социологии*, *3*, 36–40. EDN: https://elibrary.ru/PVQFJX
6. Леонидова, Е. Г., & Сидоров, М. А. (2019). Структурные изменения экономики: поиск отраслевых драйверов роста. *Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз*, *12*(6), 166–181. https://doi.org/10.15838/esc.2019.6.66.9. EDN: https://elibrary.ru/HCSQSX
7. Лучкина, В. В. (2007). Проблема повышения экологической и социальной ответственности российских лесопромышленных компаний. *Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник*, *3*, 121–124. EDN: https://elibrary.ru/INTQXF
8. Соколов, А. П. (2017). Управление устойчивым развитием промышленного предприятия на основе имеющихся ресурсов. *Экономика и предпринимательство*, *9-1*(86), 1066–1069. EDN: https://elibrary.ru/ZUIKOH
9. Старикова, М. С., Пономарева, Т. Н., & Растопчина, Ю. Л. (2017). Инструментарий оценки турбулентности внешней среды предприятия. *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова*, *7*, 187–193. https://doi.org/10.12737/article_5940f01b1c4e61.66789404. EDN: https://elibrary.ru/ZDDABH
10. Столбин, В. С., & Голякевич, С. А. (2020). Анализ научных исследований в области оценки экологического воздействия лесопромышленных машин и технологий на лесные экосистемы. *Труды БГТУ. Серия 1: Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов*, *2*(234), 149–159. EDN: https://elibrary.ru/NOYHHM

11. Чайковская, Л. А., Филин, С. А., & Хоршикян, С. В. (2017). Инвестирование продуктовых и технологических инноваций на предприятиях лесопромышленного комплекса как фактор повышения их конкурентоспособности и дохода. *Экономика и управление: проблемы, решения*, *3*(2), 25–35. EDN: https://elibrary.ru/YKTVZF
12. Accastello, C., Blanc, S., Mosso, A., & Brun, F. (2018). Assessing the timber value: A case study in the Italian Alps. *Forest Policy and Economics*, *93*, 36–44.
13. Flatberg, T., Nørstebø, V. S., Bjørkelo, K., Astrup, R., & Søvde, N. E. (2018). A mathematical model for infrastructure investments in the forest sector of coastal Norway. *Forest Policy and Economics*, *92*, 202–209.
14. Medvedev, S. O., & Zyryanov, M. A. (2024). Developing a model of forest enterprises activities with the prospect of moving into sustainable development. *Economic and Social Changes: Facts, Trends, Forecast*, *17*(2), 129–145. https://doi.org/10.15838/esc.2024.2.92.7. EDN: https://elibrary.ru/IIJESJ
15. Tham, L. T., Pretzsch, J., & Darr, D. (2020). Asian timber value chains — a systematic review and research agenda. *Forest Policy and Economics*, *112*. https://doi.org/10.1016/j.forpol.2020.102116. EDN: https://elibrary.ru/VSMFCF
16. Tu, B., Chen, Z., & Dang, J. (2025). The impact of foreign direct investment on innovation in China's forest products industry. *Forest Policy and Economics*, *170*. https://doi.org/10.1016/j.forpol.2024.103371. EDN: https://elibrary.ru/HEUEKS
17. Xiong, L., Wu, X., Cheng, B., & Wang, F. (2024). Global value chain participation, trade cost and benefits of timber industry. *Canadian Journal of Forest Research*, *54*(11), 1356–1366. https://doi.org/10.1139/cjfr-2024-0081. EDN: https://elibrary.ru/XHGTAY

References

1. Afanasyev, A. S., & Kiselyova, I. G. (2019). Implementing grading in the personnel remuneration system at a timber industry enterprise. *Proceedings of Bratsk State University. Series: Economics and Management*, *1*, 79–83. EDN: https://elibrary.ru/DQHCIS
2. Zotina, P. S. (2021). Personnel motivation as a factor of innovative development of timber industry clusters. *Economics and Management: Problems, Solutions*, *4*(10), 130–134. https://doi.org/10.36871/ek.up.p.r.2 Newton-10.04.017. EDN: https://elibrary.ru/LRVDEF
3. Kozhukhov, N. I. (2014). Balanced development of forest sector industries in the regional economic space system. *Bulletin of Moscow State Forest University — Forestry Bulletin*, *18*(3), 18–23. EDN: https://elibrary.ru/SFNIIR

4. Korelin, V. V., & Popov, N. L. (2019). Development of modern technologies and implementation of innovations at timber industry enterprises. *Proceedings of Saint Petersburg State University of Economics*, *6*(120), 95–98. EDN: https://elibrary.ru/CZLHZB
5. Koryakov, A. G. (2012). Methodological approaches to modeling sustainable development of industrial enterprises. *Bulletin of Economics, Law and Sociology*, *3*, 36–40. EDN: https://elibrary.ru/PVQFJX
6. Leonidova, E. G., & Sidorov, M. A. (2019). Structural changes in the economy: searching for sectoral growth drivers. *Economic and Social Changes: Facts, Trends, Forecast*, *12*(6), 166–181. https://doi.org/10.15838/esc.2019.6.66.9. EDN: https://elibrary.ru/HCSQSX
7. Luchkina, V. V. (2007). The issue of enhancing ecological and social responsibility of Russian timber industry companies. *Bulletin of Moscow State Forest University — Forestry Bulletin*, *3*, 121–124. EDN: https://elibrary.ru/INTQXF
8. Sokolov, A. P. (2017). Managing sustainable development of an industrial enterprise based on available resources. *Economics and Entrepreneurship*, *9-1*(86), 1066–1069. EDN: https://elibrary.ru/ZUIKOH
9. Starikova, M. S., Ponomareva, T. N., & Rastopchina, Yu. L. (2017). Tools for assessing turbulence in the enterprise's external environment. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov*, *7*, 187–193. https://doi.org/10.12737/article_5940f01b1c4e61.66789404. EDN: https://elibrary.ru/ZDDABH
10. Stolbin, V. S., & Golyakevich, S. A. (2020). Analysis of scientific research in assessing the ecological impact of timber industry machines and technologies on forest ecosystems. *Proceedings of BSTU. Series 1: Forestry, Nature Management and Processing of Renewable Resources*, *2*(234), 149–159. EDN: https://elibrary.ru/NOYHHM
11. Chaikovskaya, L. A., Filin, S. A., & Khorshikyan, S. V. (2017). Investing in product and technological innovations at timber industry enterprises as a factor in enhancing their competitiveness and income. *Economics and Management: Problems, Solutions*, *3*(2), 25–35. EDN: https://elibrary.ru/YKTVZF
12. Accastello, C., Blanc, S., Mosso, A., & Brun, F. (2018). Assessing the timber value: A case study in the Italian Alps. *Forest Policy and Economics*, *93*, 36–44.
13. Flatberg, T., Nørstebø, V. S., Bjørkelo, K., Astrup, R., & Søvde, N. E. (2018). A mathematical model for infrastructure investments in the forest sector of coastal Norway. *Forest Policy and Economics*, *92*, 202–209.
14. Medvedev, S. O., & Zyryanov, M. A. (2024). Developing a model of forest enterprises activities with the prospect of moving into sustainable development.

Economic and Social Changes: Facts, Trends, Forecast, *17*(2), 129–145. https://doi.org/10.15838/esc.2024.2.92.7. EDN: https://elibrary.ru/IIJESJ
15. Tham, L. T., Pretzsch, J., & Darr, D. (2020). Asian timber value chains — a systematic review and research agenda. *Forest Policy and Economics*, *112*. https://doi.org/10.1016/j.forpol.2020.102116. EDN: https://elibrary.ru/VSMFCF
16. Tu, B., Chen, Z., & Dang, J. (2025). The impact of foreign direct investment on innovation in China's forest products industry. *Forest Policy and Economics*, *170*. https://doi.org/10.1016/j.forpol.2024.103371. EDN: https://elibrary.ru/HEUEKS
17. Xiong, L., Wu, X., Cheng, B., & Wang, F. (2024). Global value chain participation, trade cost and benefits of timber industry. *Canadian Journal of Forest Research*, *54*(11), 1356–1366. https://doi.org/10.1139/cjfr-2024-0081. EDN: https://elibrary.ru/XHGTAY

ВКЛАД АВТОРОВ

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку статьи для публикации.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

The authors contributed equally to this article.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Медведев Сергей Олегович, кандидат экономических наук, старший научный сотрудник
Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения «Сибирский государственный университет науки и технологий академика М.Ф. Решетнева»
проспект им. газеты Красноярский рабочий, 31, г. Красноярск, 660037, Российская Федерация
medvedev_serega@mail.ru

Назарова Алина Константиновна, магистрант, инженер
Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения «Сибирский государственный университет науки и технологий академика М.Ф. Решетнева»
проспект им. газеты Красноярский рабочий, 31, г. Красноярск, 660037, Российская Федерация
alina.nazarova.01@list.ru

DATA ABOUT THE AUTHORS

Sergey O. Medvedev, Candidate of Economic Sciences, Senior Researcher
Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarsky Rabochy Ave., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
medvedev_serega@mail.ru
SPIN-code: 1652-1042
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7459-3150
ResearcherID: N-8240-2016
Scopus Author ID: 57194876019

Alina K. Nazarova, Master Student, Engineer
Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarsky Rabochy Ave., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
alina.nazarova.01@list.ru
SPIN-code: 9063-9717
ORCID: https://orcid.org/0009-0001-1161-0942

Поступила 20.02.2025 Received 20.02.2025
После рецензирования 04.04.2025 Revised 04.04.2025
Принята 29.04.2025 Accepted 29.04.2025

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-4-1206 **EDN: XNSVMV**
УДК 634.2:631.8

CC BY NC ND

Научная статья

ВЛИЯНИЕ ОРГАНО-МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ НА ПОКАЗАТЕЛИ ПРОДУКТИВНОСТИ И КАЧЕСТВА ВИНОГРАДА СОРТА ИТАЛИЯ И КОРРЕЛЯЦИОННО-СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ИССЛЕДУЕМЫХ ФАКТОРОВ

В.А. Бойко, Д.Ю. Белаш, С.В. Левченко, А.В. Романов, А.С. Бричков, Л.А. Воронина, В.В. Жаркова

Аннотация

Обоснование. Усовершенствование агротехнических приёмов возделывания столовых сортов винограда для повышения продуктивности и качества. Поиск и анализ методов влияния на ростовые процессы растения с целью повышения урожайности винограда.

Цель. Изучить особенности накопления хлорофилла, увеличения площади листовой поверхности и оценить эффективность применения препаратов ОМУ «Торфопродукт» на столовом винограде.

Материалы и методы. В статье представлены двухлетние исследований влияния эффективности применения органоминеральных удобрений (ОМУ) компании «Торфопродукт» на показатели продуктивности и качества столового винограда сорта Италия в условиях горно-долинно-приморского виноградовинодельческого района Крыма. Был математически проанализирован характер связи зависимости урожая с куста от площади листовой поверхности и средней концентрации хлорофилла в листьях виноградного растения.

Результаты и заключение. Анализ показал, что вегетационные обработки ОМУ «Торфопродукт» увеличили урожайность винограда на 7,8% по сравнению с контролем. Уровень стандартной продукции сорта Италия возрос на 2,6%. Концентрация сахаров увеличилась на 6,3%, а титруемых кислот снизилась на 9,8%. Математический анализ выявил сильную связь между урожаем и площадью листовой поверхности, а также концентрацией пигментов в листьях (коэффициент корреляции 0,80-0,90). Коэффициент детерминации R^2 составил 0,71-0,81, что указывает на то, что урожай на 80% зависит от пло-

щади листьев и на 75% – от содержания хлорофилла. Дисперсионный анализ подтверждает влияние этих факторов на урожай ($p<0,05$), демонстрируя высокую эффективность препарата.

Ключевые слова: урожай с куста; выход стандартной продукции; массовая концентрация сахаров; массовая концентрация титруемых кислот; площадь листовой поверхности; хлорофилл; критерий Фишера; дисперсионный анализ

Для цитирования. Бойко, В. А., Белаш, Д. Ю., Левченко, С. В., Романов, А. В., Бричков, А. С., Воронина, Л. А., & Жаркова, В. В. (2025). Влияние органо-минеральных удобрений на показатели продуктивности и качества винограда сорта Италия и корреляционно-статистический анализ исследуемых факторов. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(4), 383-403. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-4-1206

Original article

THE INFLUENCE OF ORGANOMINERAL FERTILIZERS ON PRODUCTIVITY AND QUALITY INDICATORS OF ITALIA GRAPE VARIETY AND CORRELATION-STATISTICAL ANALYSIS OF THE STUDIED FACTORS

V.A. Boiko, D.Yu. Belash, S.V. Levchenko, A.V. Romanov, A.S. Brichkov, L.A. Voronina, V.V. Zharkova

Abstract

Background. To study the characteristics of chlorophyll accumulation, the increase in leaf surface area, and to evaluate the effectiveness of using the OMU 'Torfoprodukt' preparations on table grapes.

To study the features of chlorophyll accumulation and the increase in leaf surface area of grapevines when using organomineral fertilizers (OMF) "Torfprodukt" and to assess the effectiveness of applying products from this group. Materials and Methods.

Purpose. The article presents two years of research on the effectiveness of organomineral fertilizers (OMF) from the company "Torfoprodukt" on productivity and quality indicators of table grapes of the Italia variety in the mountainous valley-seaside grape-growing region of Crimea. The nature of the relationship between grape yield per bush and leaf surface area, as well as the average chlorophyll concentration in grape leaves, was mathematically analyzed.

Results and conclusion. The analysis showed that vegetative treatments with OMF "Torfoprodukt" increased grape yield by 7.8% compared to the control. The standard production level of the Italia variety increased by 2.6%. Sugar concentration rose by 6.3%, while titratable acids decreased by 9.8%. Mathematical analysis revealed a strong correlation between yield and leaf surface area, as well as pigment concentration in leaves (correlation coefficient 0.80-0.90). The coefficient of determination R^2 was 0.71-0.81, indicating that yield depends 80% on leaf area and 75% on chlorophyll content. The dispersion analysis confirms the influence of these factors on yield ($p<0.05$), demonstrating the high effectiveness of the preparation.

Keywords: yield per bush; standard production output; mass concentration of sugars; mass concentration of titratable acids; leaf surface area; chlorophyll; Fisher's criterion; dispersion analysis

For citation. Boiko, V. A., Belash, D. Yu., Levchenko, S. V., Romanov, A. V., Brichkov, A. S., Voronina, L. A., & Zharkova, V. V. (2025). The influence of organomineral fertilizers on productivity and quality indicators of Italia grape variety and correlation-statistical analysis of the studied factors. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(4), 383-403. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-4-1206

Введение

Разработка и совершенствование прогрессивных технологий возделывания виноградных насаждений, в том числе с применением органоминеральных удобрений, с целью получения высококачественного урожая является актуальной проблемой современного виноградарства Российской Федерации.

Применение органоминеральных удобрений можно рассматривать как эффективный агроприем для сельскохозяйственных культур, который позволяет снизить отрицательное влияние внешней среды, повысить устойчивость хлорофилла в листьях, ускорить темпы нарастания вегетативной массы, улучшить устойчивость к стрессовым факторам, смягчить экологические проблемы, связанные с чрезмерным внесением минеральных удобрений [2; 20; 24]. Внесение органоминеральных удобрений постепенно высвобождает питательные вещества для виноградной лозы, увеличивает способность почвы удерживать воду, улучшает текстуру почвы и содержание органических веществ, а также создаёт богатую питательными веществами экосистему. В результате внесения удобрений на винограднике увеличивается количество гроздей на лозе, количество ягод в грозди и масса ягоды, что приводит к увеличению урожайности и улучшению качества винограда [16-18].

Виноградное растение по своим биологическим особенностям отличается от других культур более высокими потребностями в отдельных элементах питания. Использование современных препаратов воздействует на биохимические показатели сельскохозяйственных культур, определяет скорость фотосинтеза и создает основу для увеличения продуктивности [4; 27]. Продуктивность растений также напрямую определяется содержанием в листьях хлорофиллов, фотосинтетических пигментов, которые являются важным субстратом фотосинтеза. Накопление и формирование пигментов зависит от ряда климатических и почвенно-грунтовых условий, которые ограничивают продуктивность растений в целом.

В целом же соотношение пигментов хлорофилльной группы (хлорофилла a и хлорофилла b) определяет фотосинтетическую теорию продуктивности растений [3].

Контроль за содержанием макро и микроэлементов в вегетативных органах является главной составляющей частью мероприятий по повышению урожайности виноградного растения. Одним из наиболее важных питательных веществ для растения является азот, который, в свою очередь, отвечает за образование хлорофилла в листьях. Хлорофилл жизненно важен для фотосинтеза, который позволяет растениям получать энергию за счёт солнечной инсоляции [21; 22; 26].

Преобладающая часть содержащихся в почве микроэлементов растениям недоступна, поэтому в современных агротехнологиях проводят внекорневые обработки комплексными удобрениями. Так, например медь защищает от разрушения хлорофилл, бор и марганец активизируют процессы фотосинтеза растений. Кобальт благоприятно действует на синтез хлорофилла в листьях, уменьшает его разрушение в отсутствие освещения, увеличивает содержание аскорбиновой кислоты в растениях. Также кобальт стимулирует цикл Кребса, участвует в энергетическом обмене.

Фотосинтез – это важный физиологический процесс, протекающий в растениях. Величина листового аппарата, его структура, условия функционирования определяют величину и качество получаемой виноградной продукции. Поэтому многие агротехнические приемы направлены на усиление действия прямого солнечного света, так как для формирования урожая виноградному растению необходимо большое количество солнечной энергии [1; 6; 8; 9].

Таким образом, содержание хлорофилла является одним из факторов, которые могут способствовать росту и развитию растений, и увеличению

продуктивности и показателей качества растений. Поэтому для виноградных насаждений рекомендуется рациональное использование удобрений и разработка планов внесения удобрений с учетом конкретных питательных веществ, например, высокоэффективных биологически активных препаратов компании «Торфопродукт», полученных из органических веществ естественного происхождения.

Органоминеральное удобрение (ОМУ) компании «Торфопродукт» производится на основе экстракта из торфа, содержит комплекс органических кислот, включающий гуминовые кислоты, аминокислоты, карбоновые кислоты, поликислоты и т. д. Линейка продуктов дополнительно обогащена и предназначена для компенсации дефицита элементов питания растений на ключевых фазах развития. Препарат идеально подходит для усиления транспорта элементов питания и действующих веществ в растении с целью повышения урожайности и устойчивости к негативным внешним факторам [10].

Целью исследования является изучение особенности накопления хлорофилла, увеличения площади листовой поверхности и оценка эффективности применения препаратов ОМУ «Торфопродукт» на винограде.

Экспериментальные исследования проводились в 2023-2024 гг. на базе филиала «Морское» АО «ПАО «Массандра» и лаборатории хранения винограда ФГБУН «ВННИИВИВ «Магарач» РАН».

Объектом исследований являлся столовый сорт винограда Италия, позднего срока созревания. Получен путём скрещивания сортов Бикан на Мускат гамбургский. Кусты сильнорослые. Гроздь крупная, цилиндроконическая, ветвистая, рыхлая. Ягода крупная, овальная и яйцевидная, желтовато-янтарная, матовая, покрыта густым пруиновым налётом. Кожица прочная, толстая. Мякоть мясистая, сочная с оригинальным мускатно-цитронным ароматом. Сорт пригоден для длительного хранения.

Научная новизна. В условиях горно-долинно-приморского виноградовинодельческого района Крыма впервые было исследовано влияние и эффективность применения органоминеральных удобрений (ОМУ) компании «Торфопродукт» в целях повышения продуктивности и качества столового винограда сорта Италия.

Материалы и методы

Объектом исследований являлся столовый сорт винограда Италия, позднего срока созревания, который был получен путём скрещивания сортов Бикан × Мускат Гамбургский. Кусты сильнорослые. Гроздь круп-

ная, цилиндроконическая, ветвистая, рыхлая. Ягода крупная, овальная и яйцевидная, желтовато-янтарная, матовая, покрыта густым пруиновым налётом. Кожица прочная, толстая. Мякоть мясистая, сочная с оригинальным мускатно-цитронным ароматом. Сорт пригоден для длительного хранения.

Экспериментальные исследования проводились в 2023-2024 гг. на базе филиала «Морское» АО «ПАО «Массандра», с. Морское, г. Судак в бригаде №1 и лаборатории хранения винограда ФГБУН «ВННИИВИВ «Магарач» РАН», г. Ялта.

Опытные исследования по применению ОМУ «Торфопродукт» проводились на участке №106. Контролем выступал производственный фон на участке №107 без применения исследуемого препарата.

Схема внекорневой подкормки сформирована на основании потребности растений в питательных веществах на основных стадиях вегетации (табл. 1).

Таблица 1.

Схема применения препаратов ОМУ «Торфопродукт», сорт Италия, бригада №1, участок № 106

Препараты	Сроки применения	Расход препарата, л/га
«Торфопродукт Азот Бор»	Начало вегетации (длина побегов 10-15 см.)	4,0
«Торфопродукт под корень»		4,0
Торфопродукт «Азот Бор»	Перед цветением	4,0
«Торфопродукт под корень»		4,0
«Торфопродукт Азот Бор»	После цветения	5,0
«Торфопродукт Бор»		3,0
«Торфопродукт Азот Бор»	Начало роста	5,0
«Торфопродукт Бор»		3,0
«Торфопродукт под корень»	Начало созревания	6,0
«Торфопродукт Бор»		2,0
«Торфопродукт под корень»	Созревание	6,0
«Торфопродукт Бор»		2,0

Качественный состав применяемых препаратов отображен в Таблице 2.

Для выполнения поставленных задач было выбрано 25 учётных кустов винограда в контрольном и в опытном варианте, с которых производились замеры и отбор образцов (листья винограда) для определения площади листовой поверхности и содержания хлорофилла в фазу созревания.

Таблица 2.

Показатели качества используемых препаратов ОМУ «Торфопродукт»

Наименование показателя	«Торфопродукт под корень»	«Торфопродукт Азот Бор»	«Торфопродукт Бор»
Массовая доля гуминовых кислот, % не менее	0,1	0,1	0,1
Массовая доля общей органики, % не менее	0,18	0,18	0,18
Массовая доля сухого остатка, % не менее	0,2	0,2	0,2
общего азота (N)	–	10,0	–
общего калия (K)	4,5		
общего бора (B)	–	0,45	0,45
общего фосфора (P)	2,5		

Эффективность внекорневой подкормки оценивалась по следующим показателям:

– учёт урожая, проводили покустно путем взвешивания. Умножением числа гроздей на кусте на их среднюю массу определяли расчетную массу урожая с куста и урожайность с гектара (т/га) по каждому варианту опыта [5];

– выход стандартной продукции рассчитывали, как соотношение количества стандартных гроздей к нестандартным, умноженное на 100 %;

– массовая концентрация сахаров – ареометрическим методом (ГОСТ 27198-87);

– массовая концентрация титруемых кислот – методом титрования раствором гидроксида натрия (ГОСТ ISO 750-2013);

– площадь листовой поверхности рассчитывали по методике А.Г. Амирджанова, [7]. Измерения проводились в полевых условиях в разных вариантах опыта в конце фазы созревания перед сбором урожая. Расчет площади листовой поверхности проводили по следующей формуле:

$$S_л = \frac{\sum d * \sum l}{l_{ср} * 10000}, \quad (1)$$

где,

Sл = площадь листовой поверхности куста,

Σd = сумма диаметров листьев куста

Σl = сумма длин побегов куста

$l_{ср}$ = средняя длина побегов

– определение хлорофилла проводили спектрометрическим методом [28].

Для экстракции пигментов из средней пробы листьев отбирали навеску растительного материала массой 0,5 г, которую гомогенизировали в ступке совместно с навеской материала 0,05 г $CaCO_3$ для предотвращения феофитинизации хлорофилла. В качестве экстрагирующего агента использовали этиловый спирт 96%. Полученный раствор количественно переносили в мерную колбу на 25 мл, доводили объем этиловым спиртом до 25 мл. Оптическую плотность измеряли на фотоэлектроколориметре КФК-3, в кювете толщиной 10 мм, для определения оптической плотности использовали следующие длины волн: 665 и 649 нм.

Концентрацию хлорофилла рассчитывали по формуле:

$$C_a = 13{,}70 * D_{665} - 5{,}76 * D_{649;}$$
$$C_b = 25{,}80 * D_{665} - 7{,}60 * D_{649;}$$
$$C_{ab} = C_a + C_b, \quad (2)$$

где, C_a – концентрация хлорофилла a;

C_b – концентрация хлорофилла b;

C_{ab} – общая концентрация хлорофилла;

D_{665} – оптическая плотность раствора хлорофилла при длине волны 665 нм;

D_{649} – оптическая плотность раствора хлорофилла при длине волны 649 нм.

Влияние площади листовой поверхности виноградного куста и содержание хлорофилла в листьях винограда на среднюю массу урожая с куста было проанализировано корреляционно-регрессионным методом при помощи электронных таблиц Microsoft Excel:

– для установления характера и степени взаимосвязи между полученными экспериментальными значениями, был рассчитан коэффициент корреляции (R);

– для определения влияния площади листовой поверхности и концентрации содержания хлорофилла в листьях винограда на среднюю массу урожая с куста был рассчитан коэффициент детерминации (R^2).

С целью определения достоверности проведенного эксперимента, был проведён однофакторный дисперсионный анализ полученных экспериментальных данных, и рассчитан критерий Фишера (F), уровень значимости (P) в программе SPSS Statistics 17.0. Анализ данных производился согласно учебно-практическое пособию «Статистический анализ данных в сельском хозяйстве» [12].

Результаты и их обсуждение

Вегетационные обработки ОМУ «Торфопродукт» оказали положительное влияние на показатели продуктивности и качества винограда сорта Италия (табл. 3).

Таблица 3.

Влияние применения ОМУ «Торфопродукт» на показатели продуктивности и качества винограда сорта Италия (2023-2024 гг.)

Варианты опыта	Урожайность, т/га	Выход стандартной продукции, %	Массовая концентрация сахаров, г/дм^3	Массовая концентрация титруемых кислот, г/дм^3
Контроль	16,6	89,4	202,1	5,1
Опыт	17,9	91,7	214,8	4,6

Прибавка урожайности винограда с гектара составила 7,8%, а выход стандартной продукции – 2,6% относительно контроля. Внесение органоминеральных удобрений способствовало повышению кондиционных показателей винограда; массовая концентрация сахаров была выше на 6,3%, а массовая концентрация титруемых кислот была ниже на 9,8% чем в контрольном варианте [11; 13; 15].

Таблица 4.

Влияние применения ОМУ «Торфопродукт» на продуктивность и фитометрические показатели винограда сорта Италия (2023-2024 гг.)

Варианты опыта	Урожай с куста, кг	Концентрация хлорофилла, мг/л	Площадь листовой поверхности, м^2
Контроль	7,9	3,52	6,79
Опыт	8,5	3,78	7,15

Многочисленные исследования показывают, что урожайность винограда, зависит от площади листовой поверхности растения и характера ее размещения, а также от количества поглощаемой растением солнечной радиации [14; 19; 23; 25]. Увеличение площади листовой поверхности после применения ОМУ «Торфопродукт» по сравнению с контрольным вариантом составило 5,0%, а концентрация хлорофилла – 6,9%.

Графическое представление зависимости между исследуемым показателями свидетельствует о наличии линейной положительной корреляция, так как при возрастании площади листовой поверхности и концентрации пигментов происходит увеличение урожая с куста во всех вариантах опыта (Рисунок 1, 2).

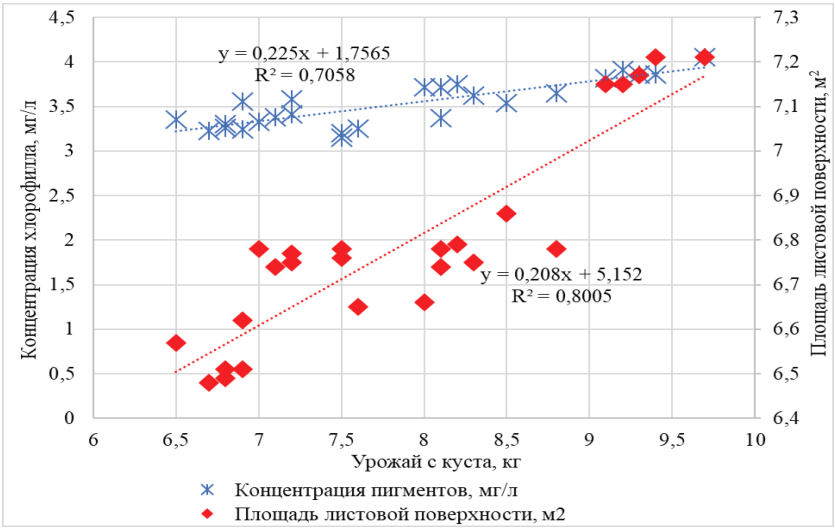


Рис. 1. Влияние площади листовой поверхности и средней концентрации пиментов в листьях винограда на урожай с куста (контроль), 2023-2024 гг.

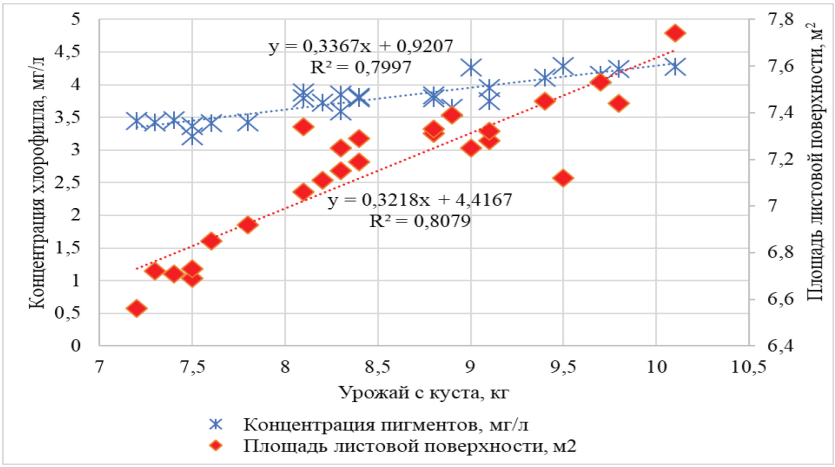


Рис. 2. Влияние площади листовой поверхности и средней концентрации пиментов в листьях винограда на урожай с куста (опыт), 2023-2024 гг.

Проведённый корреляционно-статистический анализ показал наличие тесной и достоверной связи между исследуемыми факторами.

Коэффициент корреляции (R) зависимости урожая с куста от площади листовой поверхности в контрольном и в опытном варианте был равен 0,89 и 0,90, при этом коэффициент детерминации (R^2) равнялся 0,80 и 0,81. Следовательно выполняется условие, при котором коэффициент корреляции R>0,7, что свидетельствует о наличии тесной и достоверной связи. Также установлено, что показатель «урожай с куста» примерно на 80% зависит от показателя «площадь листовой поверхности» (Рисунок 1, 2).

R и R^2 зависимости урожая с куста от концентрации хлорофилла в листьях винограда в контроле был равен 0,84 и 0,71, в опыте 0,89 и 0,80. Проведённый анализ указывает о наличие тесной и достоверной связи, при этом зависимость показателя «урожай с куста» от показателя «концентрации хлорофилла в листьях винограда» составило также примерно 75%. (Рисунок 1, 2).

Данные полученные после проведения однофакторного дисперсионного анализа показывают, что значение $F>F_{крит}$, при $p<0,05$ во всех вариантах опыта:

– в контрольном варианте зависимости урожая с куста от площади листовой поверхности и средней концентрации хлорофилла в листьях винограда F=28,7 и 462,7, при $P=2,4*10^{-6}$ и $2,7*10^{-26}$; $F_{крит}=4,04$

– в опытном варианте зависимости урожая с куста от площади листовой поверхности и средней концентрации хлорофилла в листьях винограда F=56,6 и 688,0, при $P=1,2*10^{-9}$ и $4,1*10^{-30}$; $F_{крит}=4,04$

Следовательно, площадь листовой поверхности и среднее содержание хлорофилла в листьях винограда влияет на урожай с куста винограда сорта Италия.

Заключение

Получены двухлетние экспериментальные данные влияния эффективности применения ОМУ «Торфопродукт» на показатели продуктивности и качества столового винограда сорта Италия в природно-климатических условиях Республики Крым. Установлено, что:

– вегетационные обработки ОМУ «Торфопродукт» способствовали увеличению урожайности исследуемого сорта винограда Италия на 7,8%, и выхода стандартной продукции на 2,6% относительно контроля;

– внесение внекорневых подкормок способствовало повышению кондиционных показателей винограда; массовая концентрация сахаров была выше на 6,3%, а массовая концентрация титруемых кислот была ниже на 9,8% относительно контроля;

– установлено наличие тесной и достоверной связи урожая с куста с площадью листовой поверхности и средней концентрации пиментов в листьях винограда. Коэффициент корреляции варьировался в пределах 0,80 – 0,90 в зависимости от варианта опыта и исследуемого показателя.

– коэффициент детерминации R^2 находился в пределах от 0,71 до 0,81, следовательно показатель «урожай с куста» на 80 % зависит от показателя «площадь листовой поверхности» и на 75% - концентрации хлорофилла;

– достоверность проведенного эксперимента доказано методом дисперсионного анализа; значение $F>F_{крит}$, при $p<0,05$ было во всех вариантах опыта, следовательно площадь листовой поверхности и содержание хлорофилла в листьях влияет на среднюю массу урожая с куста винограда сорта Италия.

Информация о спонсорстве. Работа выполнялась в рамках выполнения хоздоговора №116/2024 от 22 апреля 2024 г. «Разработка регламента применения препаратов ООО «Торфопродукт» на виноградниках в природно-климатических условиях Республики Крым».

Список литературы

1. Бейбулатов, М. Р. (2014). Физиологические показатели при разных уровнях нагрузки и длины обрезки плодовых лоз винограда. *Плодоводство и виноградарство Юга России*, *26*(2), 86–100. EDN: https://elibrary.ru/RXHODZ
2. Икоева, Л. П., & Хаева, О. Э. (2022). Фотосинтетическая деятельность картофеля в зависимости от способов применения стимулятора роста в предгорной зоне РСО-Алания. *Аграрный вестник Урала*, *7*(222), 26–35. https://doi.org/10.32417/1997-4868-2022-222-07-26-35. EDN: https://elibrary.ru/GZTCGW
3. Москаленко, И. В., Ноздрачева, Е. В., Анищенко, Л. Н., & Поцепай, С. Н. (2024). К вопросу о повышении скорости биохимических процессов у сельскохозяйственных растений при применении кремнийсодержащей нанодобавки. *Вестник Брянской ГСХА*, *2*(102), 9–13. EDN: https://elibrary.ru/HQJBXW
4. Кузин, Е. Н., Арефьев, А. Н., & Кузина, Е. Е. (2023). Влияние кремнийсодержащей агроруды (диатомита) на урожайность сельскохозяйственных культур и качество растениеводческой продукции. *Агрохимия*, *12*, 57–66. https://doi.org/10.31857/S0002188123120116. EDN: https://elibrary.ru/IFXTPZ
5. Лазаревский, М. А. (1963). *Изучение сортов винограда*. Ростов-на-Дону: Изд-во Ростовского ун-та, 152 с.
6. Малых, Г. П., & Магамадов, А. С. (2013). Влияние кобальта на физиологические процессы, урожай и качество винограда при выращивании на тер-

ских песках. *Плодоводство и виноградарство Юга России*, *24*(6), 94–102. EDN: https://elibrary.ru/RKOFOT

7. Амирджанов, А. Г., Шульгин, И. А., & Сулейманов, Д. С. (1982). *Методические указания по учёту и контролю важнейших показателей фотосинтетической деятельности винограда в насаждениях для её оптимизации*. Баку: Типография АН Азерб. ССР, 12–13 с.
8. Модонкаева, А. Э., & Лосинская, Я. Н. (2010). Влияние внекорневых микроудобрений на агробиологические показатели и выход стандартной продукции столовых сортов винограда. *Виноградарство и виноделие*, *40*, 42–44. EDN: https://elibrary.ru/VDHAAD
9. Олейченко, С. Н., & Каимова, С. М. (2014). Перспективы стабилизации урожайности винограда на юге и юго-востоке Казахстана. *Известия НАН РК*, *2*, 24.
10. *Органо-минеральное удобрение (ОМУ) «Торфопродукт»* [Электронный ресурс]. Retrieved from https://torfpro.ru
11. Белаш, Д. Ю., Левченко, С. В., Бойко, В. А., & Романов, А. В. (2021). Оценка влияния внекорневой подкормки препаратом «Алга Супер» на показатели продуктивности и качества винограда. *Магарач. Виноградарство и виноделие*, *23*(1), 27–31. https://doi.org/10.35547/IM.2021.28.40.004. EDN: https://elibrary.ru/AORGLH
12. Рагимов, А. О., & Мазиров, М. А. (2022). *Статистический анализ данных в сельском хозяйстве: учебно-практическое пособие*. Владимир: Изд-во ВлГУ, 118–123 с. ISBN: 978-5-9984-1477-0
13. El-Ezz, S. F. A., Lo'ay, A. A., Al-Harbi, N. A., Al-Qahtani, S. M., Allam, H. M., Abdein, M. A., & Abdelgawad, Z. A. (2022). A comparison of the effects of several foliar forms of magnesium fertilization on 'Superior Seedless' (Vitis vinifera L.) in saline soils. *Coatings*, *12*(2), 201. https://doi.org/10.3390/coatings12020201. EDN: https://elibrary.ru/VYVYFU
14. Wei, G., Zhang, M., Cui, B., Wei, Z., & Liu, F. (2024). Ammonium nitrogen combined with partial root-zone drying enhanced fruit quality of tomato under elevated atmospheric CO_2. *Scientia Horticulturae*, *323*, 112514. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112514. EDN: https://elibrary.ru/GSGCSV
15. James, A., Mahinda, A., Mwamahonje, A., Rweyemamu, E., Mrema, E., Aloys, K., Swai, E., Mpore, F., & Massawe, C. (2022). A review on the influence of fertilizers application on grape yield and quality in the tropics. *Journal of Plant Nutrition*, *46*, 1–22. https://doi.org/10.1080/01904167.2022.2160761. EDN: https://elibrary.ru/RSUKKR
16. James, A., Mahinda, A., Mwamahonje, A., Rweyemamu, E. W., Mrema, E., Aloys, K., Swai, E., Mpore, F. J., & Massawe, C. (2022). A review on the influ-

ence of fertilizers application on grape yield and quality in the tropics. *Journal of Plant Nutrition*, *46*(12), 2936–2957. https://doi.org/10.1080/01904167.2022.2160761. EDN: https://elibrary.ru/RSUKKR

17. Bassiony, S. S., & Ibrahim, M. G. (2016). Effect of silicon foliar sprays combined with moringa leaves extract on yield and fruit quality of «Flame Seedless» grape (*Vitis vinifera* L.). *Journal of Plant Production*, *7*(10), 1127–1135. https://doi.org/10.21608/jpp.2016.46946
18. Ben Yahmed, J., & Ben Mimoun, M. (2019). Effects of foliar application and fertigation of potassium on yield and fruit quality of 'Superior Seedless' grapevine. *Acta Horticulturae*, *1253*, 367–372. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2019.1253.48
19. Rakhmankulova, Z. F., Shuyskaya, E. V., Prokofieva, M. Y., Saidova, L. T., & Voronin, P. Y. (2023). Effect of elevated CO_2 and temperature on plants with different type of photosynthesis: quinoa (C_3) and amaranth (C_4). *Russian Journal of Plant Physiology*, *70*, 117. https://doi.org/10.1134/S1021443723601349. EDN: https://elibrary.ru/HGOYCH
20. Arrobas, M., Ferreira, I. Q., Freitas, S., Verdial, J., & Rodrigues, M. A. (2014). Guidelines for fertilizer use in vineyards based on nutrient content of grapevine parts. *Scientia Horticulturae*, *172*, 191–198. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.04.016
21. Garrido, A., Serôdio, J., De Vos, R., Conde, A., & Cunha, A. (2019). Influence of foliar kaolin application and irrigation on photosynthetic activity of grape berries. *Agronomy*, *9*(11), 685. https://doi.org/10.3390/agronomy9110685
22. Somkuwar, R. G., Kakade, P. B., Dhemre, J. K., Gharate, P. S., Deshmukh, N. A., & Nikumbhe, P. H. (2024). Leaf area influences photosynthetic activities, raisin yield and quality in Manjari Kishmish grape variety. *Archives of Current Research International*, *24*(6), 613–622. https://doi.org/10.9734/acri/2024/v24i6817. EDN: https://elibrary.ru/ZJKPGM
23. Kakade, P. B., Somkuwar, R. G., Jadhav, A. S., Dhemre, J. K., Nikumbhe, P. H., & Deshmukh, N. A. (2024). Leaf area influences photosynthetic activity, yield, quality and juice recovery in Manjari Medika grape. *International Journal of Bio-Resource and Stress Management*, *15*(8), 1–8. https://doi.org/10.23910/1.2024.5443
24. Ali, I., Wang, X., Abbas, W. M., Hassan, M. U., Shafique, M., Tareen, M. J., Fiaz, S., Ahmed, W., & Qayyum, A. (2021). Quality responses of table grapes 'Flame Seedless' as effected by foliarly applied micronutrients. *Horticulturae*, *7*(11). https://doi.org/10.3390/horticulturae7110462. EDN: https://elibrary.ru/EAJZCF

25. Zhou, Y., Mahmoud Ali, H. S., Xi, J., Yao, D., Zhang, H., Li, X., Yu, K., & Zhao, F. (2024). Response of photosynthetic characteristics and yield of grape to different CO_2 concentrations in a greenhouse. *Frontiers in Plant Science*, *15*. https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1378749. EDN: https://elibrary.ru/HNDCHK
26. Van, K., & Reeves, J. B. (2002). Nitrogen mineralization potential of dairy manures and its relationship to composition. *Biology and Fertility of Soils*, *36*(2), 118–123. https://doi.org/10.1007/s00374-002-0516-y. EDN: https://elibrary.ru/BDZKEL
27. Sabir, A., Yazar, K., Sabir, F., Kara, Z., Yazici, M. A., & Goksu, N. (2014). Vine growth, yield, berry quality attributes and leaf nutrient content of grapevines as influenced by seaweed extract (*Ascophyllum nodosum*) and nanosize fertilizer pulverizations. *Scientia Horticulturae*, *175*, 1–8. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.05.021
28. Wintermans, J. F., & de Mots, A. (1965). Spectrophotometric characteristics of chlorophylls *a* and *b* and their pheophytins in ethanol. *Biochimica et Biophysica Acta*, *109*(2), 448–453. https://doi.org/10.1016/0926-6585(65)90170-6

References

1. Beybulatov, M. R. (2014). Physiological parameters at different levels of load and pruning length of fruit vines. *Fruit Growing and Viticulture of Southern Russia*, *26*(2), 86–100. EDN: https://elibrary.ru/RXHODZ
2. Ikoeva, L. P., & Khaeva, O. E. (2022). Photosynthetic activity of potato depending on methods of growth stimulator application in the piedmont zone of North Ossetia–Alania. *Agrarian Bulletin of the Urals*, *7*(222), 26–35. https://doi.org/10.32417/1997-4868-2022-222-07-26-35. EDN: https://elibrary.ru/GZTCGW
3. Moskalenko, I. V., Nozdracheva, E. V., Anishchenko, L. N., & Potsepai, S. N. (2024). On increasing the rate of biochemical processes in agricultural plants using silicon-containing nanoadditives. *Bulletin of Bryansk State Agricultural Academy*, *2*(102), 9–13. EDN: https://elibrary.ru/HQJBXW
4. Kuzin, E. N., Arefyev, A. N., & Kuzina, E. E. (2023). Effect of silicon-containing agromineral (diatomite) on crop yield and quality of plant products. *Agrochemistry*, *12*, 57–66. https://doi.org/10.31857/S0002188123120116. EDN: https://elibrary.ru/IFXTPZ
5. Lazarevsky, M. A. (1963). *Study of grape varieties*. Rostov-on-Don: Rostov University Press. 152 pp.
6. Malykh, G. P., & Magamadov, A. S. (2013). Effect of cobalt on physiological processes, yield, and quality of grapes grown on the Terek sands. *Fruit Growing and Viticulture of Southern Russia*, *24*(6), 94–102. EDN: https://elibrary.ru/RKOFOT

7. Amirjanov, A. G., Shulgin, I. A., & Suleimanov, D. S. (1982). *Methodological guidelines for recording and monitoring key indicators of photosynthetic activity in vineyards to optimize it*. Baku: Printing House of the Academy of Sciences of the Azerbaijan SSR. 12–13 pp.
8. Modonkaeva, A. E., & Losinskaya, Ya. N. (2010). Effect of foliar micronutrient fertilizers on agrobiological parameters and yield of standard table grape varieties. *Viticulture and Winemaking*, *40*, 42–44. EDN: https://elibrary.ru/VDHAAD
9. Oleichenko, S. N., & Kaimova, S. M. (2014). Prospects for stabilizing grape yield in the south and southeast of Kazakhstan. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Kazakhstan*, *2*, 24.
10. Organic-mineral fertilizer (OMU) "Torfoproduct". Retrieved from: https://torf-pro.ru
11. Belash, D. Yu., Levchenko, S. V., Boiko, V. A., & Romanov, A. V. (2021). Assessment of the effect of foliar feeding with the "Alga Super" preparation on grape productivity and quality indicators. *Magarach. Viticulture and Winemaking*, *23*(1), 27–31. https://doi.org/10.35547/IM.2021.28.40.004. EDN: https://elibrary.ru/AORGLH
12. Ragimov, A. O., & Mazirov, M. A. (2022). *Statistical data analysis in agriculture: a practical guide*. Vladimir: Vladimir State University Press, pp. 118–123. ISBN: 978-5-9984-1477-0
13. El-Ezz, S. F. A., Lo'ay, A. A., Al-Harbi, N. A., Al-Qahtani, S. M., Allam, H. M., Abdein, M. A., & Abdelgawad, Z. A. (2022). A comparison of the effects of several foliar forms of magnesium fertilization on 'Superior Seedless' (Vitis vinifera L.) in saline soils. *Coatings*, *12*(2), 201. https://doi.org/10.3390/coatings12020201. EDN: https://elibrary.ru/VYVYFU
14. Wei, G., Zhang, M., Cui, B., Wei, Z., & Liu, F. (2024). Ammonium nitrogen combined with partial root-zone drying enhanced fruit quality of tomato under elevated atmospheric CO_2. *Scientia Horticulturae*, *323*, 112514. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112514. EDN: https://elibrary.ru/GSGCSV
15. James, A., Mahinda, A., Mwamahonje, A., Rweyemamu, E., Mrema, E., Aloys, K., Swai, E., Mpore, F., & Massawe, C. (2022). A review on the influence of fertilizers application on grape yield and quality in the tropics. *Journal of Plant Nutrition*, *46*, 1–22. https://doi.org/10.1080/01904167.2022.2160761. EDN: https://elibrary.ru/RSUKKR
16. James, A., Mahinda, A., Mwamahonje, A., Rweyemamu, E. W., Mrema, E., Aloys, K., Swai, E., Mpore, F. J., & Massawe, C. (2022). A review on the influence of fertilizers application on grape yield and quality in the tropics. *Journal of Plant Nutrition*, *46*(12), 2936–2957. https://doi.org/10.1080/01904167.2022.2160761. EDN: https://elibrary.ru/RSUKKR

17. Bassiony, S. S., & Ibrahim, M. G. (2016). Effect of silicon foliar sprays combined with moringa leaves extract on yield and fruit quality of «Flame Seedless» grape (*Vitis vinifera* L.). *Journal of Plant Production*, *7*(10), 1127–1135. https://doi.org/10.21608/jpp.2016.46946
18. Ben Yahmed, J., & Ben Mimoun, M. (2019). Effects of foliar application and fertigation of potassium on yield and fruit quality of 'Superior Seedless' grapevine. *Acta Horticulturae*, *1253*, 367–372. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2019.1253.48
19. Rakhmankulova, Z. F., Shuyskaya, E. V., Prokofieva, M. Y., Saidova, L. T., & Voronin, P. Y. (2023). Effect of elevated CO_2 and temperature on plants with different type of photosynthesis: quinoa (C_3) and amaranth (C_4). *Russian Journal of Plant Physiology*, *70*, 117. https://doi.org/10.1134/S1021443723601349. EDN: https://elibrary.ru/HGOYCH
20. Arrobas, M., Ferreira, I. Q., Freitas, S., Verdial, J., & Rodrigues, M. A. (2014). Guidelines for fertilizer use in vineyards based on nutrient content of grapevine parts. *Scientia Horticulturae*, *172*, 191–198. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.04.016
21. Garrido, A., Serôdio, J., De Vos, R., Conde, A., & Cunha, A. (2019). Influence of foliar kaolin application and irrigation on photosynthetic activity of grape berries. *Agronomy*, *9*(11), 685. https://doi.org/10.3390/agronomy9110685
22. Somkuwar, R. G., Kakade, P. B., Dhemre, J. K., Gharate, P. S., Deshmukh, N. A., & Nikumbhe, P. H. (2024). Leaf area influences photosynthetic activities, raisin yield and quality in Manjari Kishmish grape variety. *Archives of Current Research International*, *24*(6), 613–622. https://doi.org/10.9734/acri/2024/v24i6817. EDN: https://elibrary.ru/ZJKPGM
23. Kakade, P. B., Somkuwar, R. G., Jadhav, A. S., Dhemre, J. K., Nikumbhe, P. H., & Deshmukh, N. A. (2024). Leaf area influences photosynthetic activity, yield, quality and juice recovery in Manjari Medika grape. *International Journal of Bio-Resource and Stress Management*, *15*(8), 1–8. https://doi.org/10.23910/1.2024.5443
24. Ali, I., Wang, X., Abbas, W. M., Hassan, M. U., Shafique, M., Tareen, M. J., Fiaz, S., Ahmed, W., & Qayyum, A. (2021). Quality responses of table grapes 'Flame Seedless' as effected by foliarly applied micronutrients. *Horticulturae*, *7*(11). https://doi.org/10.3390/horticulturae7110462. EDN: https://elibrary.ru/EAJZCF
25. Zhou, Y., Mahmoud Ali, H. S., Xi, J., Yao, D., Zhang, H., Li, X., Yu, K., & Zhao, F. (2024). Response of photosynthetic characteristics and yield of grape to different CO_2 concentrations in a greenhouse. *Frontiers in Plant Sci-*

ence, *15*. https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1378749. EDN: https://elibrary.ru/HNDCHK

26. Van, K., & Reeves, J. B. (2002). Nitrogen mineralization potential of dairy manures and its relationship to composition. *Biology and Fertility of Soils*, *36*(2), 118–123. https://doi.org/10.1007/s00374-002-0516-y. EDN: https://elibrary.ru/BDZKEL
27. Sabir, A., Yazar, K., Sabir, F., Kara, Z., Yazici, M. A., & Goksu, N. (2014). Vine growth, yield, berry quality attributes and leaf nutrient content of grapevines as influenced by seaweed extract (*Ascophyllum nodosum*) and nanosize fertilizer pulverizations. *Scientia Horticulturae*, *175*, 1–8. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.05.021
28. Wintermans, J. F., & de Mots, A. (1965). Spectrophotometric characteristics of chlorophylls *a* and *b* and their pheophytins in ethanol. *Biochimica et Biophysica Acta*, *109*(2), 448–453. https://doi.org/10.1016/0926-6585(65)90170-6

ВКЛАД АВТОРОВ

Бойко В.А., Левченко С.В., Бричков А.С., Жаркова В.В.: разработка концепции научной работы, постановка опыта и методологии.

Белаш Д.Ю., Романов А.В., Воронина Л.В.: сбор и анализ данных, статистическая обработка полученных результатов, составление черновика рукописи.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Vladimir A. Boiko, Svetlana V. Levchenko, Anton S. Brichkov, Valentina V. Zharkova: development of the scientific concept, experiment design, and methodology.

Dmitriy Yu. Belash, Aleksandr V. Romanov, Ludmila A. Voronina: data collection and analysis, statistical processing of the results, drafting of the manuscript.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Бойко Владимир Александрович, кандидат сельскохозяйственных наук, заведующий лабораторией хранения винограда
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Всероссийский национальный научно-исследовательский институт виноградарства и виноделия «Магарач» РАН»
ул. Кирова, 31, г. Ялта, Республика Крым, 298600, Российская Федерация
vovhim@mail.ru

Белаш Дмитрий Юрьевич, младший научный сотрудник лаборатории хранения винограда
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Всероссийский национальный научно-исследовательский институт виноградарства и виноделия «Магарач» РАН»
ул. Кирова, 31, г. Ялта, Республика Крым, 298600, Российская Федерация
dima-244@mail.ru

Левченко Светлана Валентиновна, доктор сельскохозяйственных наук, главный научный сотрудник лаборатории хранения винограда
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Всероссийский национальный научно-исследовательский институт виноградарства и виноделия «Магарач» РАН»
ул. Кирова, 31, г. Ялта, Республика Крым, 298600, Российская Федерация
svelevchenko@rambler.ru

Романов Александр Вадимович, младший научный сотрудник лаборатории хранения винограда
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Всероссийский национальный научно-исследовательский институт виноградарства и виноделия «Магарач» РАН»
ул. Кирова, 31, г. Ялта, Республика Крым, 298600, Российская Федерация
cod7-4orever@mail.ru

Бричков Антон Сергеевич, кандидат технических наук, генеральный директор
ООО «Торфопродукт»
ул. Мокрушина, 13а, г. Томск, 634545, Российская Федерация
anton_br@rambler.ru

Воронина Людмила Анатольевна, кандидат сельскохозяйственных наук, заведующий биостанцией; заведующий лабораторией НИОКР
Национальный Исследовательский Томский Государственный Университет; ООО «Торфопродукт»

ул. Ленина, 36, г. Томск, 634050, Российская Федерация; ул. Мокрушина, 13а, г. Томск, 634545, Российская Федерация
vl79@mail.ru

Жаркова Валентина Викторовна, кандидат химических наук, доцент кафедры экологи, природопользования и экологической инженерии; заведующий химической лабораторией
Национальный Исследовательский Томский Государственный Университет; ООО «Торфопродукт»
ул. Ленина, 36, г. Томск, 634050, Российская Федерация; ул. Мокрушина, 13а, г. Томск, 634545; Российская Федерация
petrovavalentina2012@mail.ru

DATA ABOUT THE AUTHORS

Vladimir A. Boiko, Candidate of Agricultural sciences, Head of the Department of Grape Storage
All-Russian National Research Institute of Viticulture and Winemaking "Magarach" of RAS
31, Kirova Str., Yalta, Republic of Crimea, 298600, Russian Federation
vovhim@mail.ru
SPIN-code: 8856-2508
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2401-7531

Dmitriy Yu. Belash, Junior Researcher of the Department of Grape Storage
All-Russian National Research Institute of Viticulture and Winemaking "Magarach" of RAS
31, Kirova Str., Yalta, Republic of Crimea, 298600, Russian Federation
dima-244@mail.ru
SPIN-code: 7542-7409
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3525-2948

Svetlana V. Levchenko, Doctor of Agricultural sciences, Chief Researcher of the Department of Grape Storage
All-Russian National Research Institute of Viticulture and Winemaking "Magarach" of RAS
31, Kirova Str., Yalta, Republic of Crimea, 298600, Russian Federation
svelevchenko@rambler.ru
SPIN-code: 6665-0084

ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5423-0520
Scopus Author ID: 56388529400

Aleksandr V. Romanov, Junior Researcher of the Department of Grape Storage
All-Russian National Research Institute of Viticulture and Winemaking "Magarach" of RAS
31, Kirova Str., Yalta, Republic of Crimea, 298600, Russian Federation
cod7-4orever@mail.ru
SPIN-code: 9716-9972
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9999-2657

Anton S. Brichkov, Candidate of Technical Sciences, General Director
Torfoproduct LLC
13a, Mokrushina Str., Tomsk, 634545, Russian Federation
anton_br@rambler.ru
SPIN-code: 3225-9001
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3375-6440
Scopus Author ID: 55376380700

Ludmila A. Voronina, Candidate of Agricultural, Head of the Biological Station; Head of the R&D Laboratory
National Research Tomsk State University; Torfoproduct LLC
36, Lenin Ave., Tomsk, 634050, Russia Federation; 13a, Mokrushina Str., Tomsk, 634545, Russian Federation
petrovavalentina2012@mail.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9820-7047

Valentina V. Zharkova, Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor; Head of the Chemical Laboratory
National Research Tomsk State University; Torfoproduct LLC
36, Lenin Ave., Tomsk, 634050, Russia Federation; 13a, Mokrushina Str., Tomsk, 634545, Russian Federation
petrovavalentina2012@mail.ru
SPIN-code: 3178-9690
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7146-410X
Researcher ID: F-8347-2017
Scopus Author ID: 57197736209

Поступила 08.11.2024
После рецензирования 30.01.2025
Принята 13.02.2025

Received 08.11.2024
Revised 30.01.2025
Accepted 13.02.2025

ЗДРАВООХРАНЕНИЕ И ПРОФИЛАКТИЧЕСКАЯ МЕДИЦИНА

PUBLIC HEALTH AND PREVENTIVE MEDICINE

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-4-1188 **EDN: YPWCOK**
УДК 616-006.04:636.034

Original article

STUDY THE IMPACT OF PURIFIED STAPHYLOXANTHIN EXTRACTED FROM STAPHYLOCOCCUS AUREUS ON CAL-51 CANCER CELL LINE

T.H. Hassan, H.A. Ali, M.M. Sharba

Abstract

Background. Breast cancer is a disease characterized by the abnormal growth of breast cells, which can grow uncontrollably and form tumors. If left untreated, these tumors can spread throughout the body and become life-threatening.

The CAL51 cell line was first isolated from a malignant pleural effusion of a woman with metastatic breast cancer. These cells grow in continuous culture and exhibit the morphological and ultrastructural features of epithelial cells of mammary origin. They are tumorigenic in nude mice and form colonies in soft agar. Estrogen receptors are not detected in these cells.

This study aimed to investigate the cytotoxicity of purified staphyloxanthin on a specific breast cancer model, the CAL51 cell line, and to demonstrate the pigment's effect as a potential treatment for this type of cancer. The study also sought to determine the ideal concentration of staphyloxanthin required to inhibit tumor cell growth. In addition, it evaluated the effect of the pigment on a normal, non-malignant cell line (REF cells).

Materials and methods. A total of 106 specimens were collected from hospitals in Baghdad. Patients of different age groups, both male and female, were included in the study, which spanned from October to April 2023. All bacterial isolates were

examined for their microscopic, biochemical, and cultural characteristics. The results were further confirmed using the Vitek2 system.

Staphyloxanthin was extracted using ethyl acetate and acetone as solvents and purified through column chromatography. Four concentrations of the staphyloxanthin pigment, incubated for 24 hours, were used in the trial treatment of the CAL-51 tumor cell line and the normal REF cell line in vitro.

Results. A total of 53 bacterial isolates were collected, with 50% identified as *Staphylococcus aureus*. The results indicated that the primary source of *S. aureus* infection was the nasal cavity (from patients and medical staff), followed by wound ulcers and burns, which accounted for 38.7% of the infections. These sites were identified as the most common sources of bacterial infection.

In addition, the results showed that bacterial infections in urine and blood samples accounted for 22% and 26%, respectively, while 21% of the isolates were obtained from eye samples. Other sources of bacterial isolates were found at lower levels.

The ability of the bacteria to produce the pigment was tested, with the TID12 strain showing the highest production value of 1.87.

The extracted pigment concentration was 170.997 U/cell. In the CAL-51 tumor cell line, the maximum inhibition rate was 83% at a concentration of 1000 μg/ml, followed by 76% at 500 μg/ml, 73% at 250 μg/ml, and 70% at 125 μg/ml.

In contrast, for the normal REF cell line, tested at the maximum time point of 72 hours, the inhibition rate was significantly lower: 28% at 1000 μg/ml, 25% at 500 μg/ml, 22% at 250 μg/ml, and 20% at 125 μg/ml.

Conclusion. The purified staphyloxanthin pigment demonstrated a cytotoxic effect on the CAL-51 cell line at varying concentrations. However, it exhibited little to no effect on the normal REF cell line.

Keywords: staphyloxanthin pigment; CAL-51; REF; TID12; breast cancer; cell line

For citation. Hassan, T. H., Ali, H. A., & Sharba, M. M. (2025). Study the impact of purified staphyloxanthin extracted from *Staphylococcus aureus* on CAL-51 cancer cell line. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(4), 404-416. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-4-1188

Introduction

The objective of this work was to examine the cytotoxic effects of bacterial staphyloxanthin on the normal cell line (REF) and the breast cancer cell line CAL-51. In addition, the study aimed to evaluate the safety of using DMSO as a solvent on both cancerous and normal cell lines.

Staphylococcus aureus is a well-known human pathogen responsible for a variety of clinical symptoms [1]. It is a Gram-positive bacterium with a cocci

shape that forms “grape-like” clusters. The term “aureus,” meaning golden or yellow, refers to the color of its colonies. When cultured, *S. aureus* can withstand up to 10% NaCl and grow within a temperature range of 18°C to 40°C. It is often classified as a facultative anaerobe. Standard identification tests include mannitol fermentation, coagulase, and catalase tests [2].

Literature review

Staphyloxanthin is a carotenoid pigment produced by certain strains of *Staphylococcus aureus*. Carotenoids are physiologically active substances with strong antioxidant and anticancer properties [3]. Membrane-bound carotenoids, such as staphyloxanthin, are composed of triterpenoid carotenoids. These differ from the C40 carotenoids found in other organisms by their unique C30 chain [4].

To develop effective anticancer drugs with strong antioxidant activity and minimal toxicity to host cells, researchers have focused extensively on natural compounds [5]. Antioxidant compounds are believed to reduce mutagenesis and carcinogenesis by decreasing oxidative DNA damage and oxidative stress-induced cell proliferation [6].

Preclinical studies have demonstrated significant in vivo and in vitro anticancer effects of carotenoid pigments derived from microorganisms, suggesting their potential therapeutic applications [7]. This study focuses on evaluating the anticancer effects of the staphyloxanthin carotenoid pigment produced by bacteria to assess its potential for treating tumors.

CAL-51 is a widely used breast cancer cell line replicated by various research organizations over many years [8]. It is considered a reliable model for global research on breast tumors, including studies on cancer therapies [9]. The CAL-51 cell line was derived from a malignant pleural effusion of a woman with metastatic breast cancer. These cells display the morphological, ultrastructural, and immunohistochemical characteristics of mammary epithelial cells. They grow in continuous culture, are tumorigenic in nude mice, and form colonies in soft agar. However, they do not exhibit estrogen receptors [10].

Previous studies have shown that certain natural products derived from plants exhibit significant cytotoxicity against CAL-51 triple-negative breast cancer cells, often achieving lower IC50 values [11].

Materials and methods

Materials

A total of 109 distinct pathogenic specimens were collected from patients in hospitals located in Baghdad. The patients varied in age and gender, and

the specimens were obtained between December 2022 and March 2023. The samples included blood, urine, eye secretions, and specimens from burns and wounds.

Assessment the ability of isolates to produce staphyloxanthin

To assess staphyloxanthin formation, a tube containing 10 ml of prepared brain heart broth was inoculated with 100 µl of bacterial isolate for each sample. The isolates were cultured at 37°C for 18 hours to achieve a concentration of 1.5×10^8 CFU/ml, as determined by comparison with the McFarland standard. Subsequently, 100 µl of each isolate was added to skim milk agar, which was incubated at 37°C for two days, followed by an additional two days at 20°C.

A positive result was indicated by the growth's appearance with yellow or orange pigmentation [12]. The pigment extraction from the selected isolate (TID12) was performed using ethanol and ethyl acetate solvents, based on the method described in [13].

The extraction technique involved removing mature bacterial cells from the milk agar plates and rinsing the agar surfaces with double-distilled water. The harvested cells were centrifuged at 6000 rpm for 15 minutes. The resulting pellet was suspended in 10 ml of ethanol solvent, while the supernatant was discarded. The extract was incubated at 40°C for 20 minutes, and the supernatant was concentrated under vacuum to isolate the pigment.

For further extraction steps, 1.7 M aqueous NaCl solution (1:1 v/v) and ethyl acetate were added, followed by vortex mixing. The crude extract was collected under vacuum, and the total pigment volume was quantified [12].

Staphyloxanthin assay

According to the procedure described by [14], the extracted pigment was quantified using the method outlined in [15]: The carotenoid content was measured in units per cell using the following equation:

$$\text{Carotenoid measurement (unit/cell)} = (V \times A / 0.175 \times W),$$

where: $\boldsymbol{A}$ is refers to the absorbance of the pigment dilution measured at 450 nm, $\boldsymbol{V}$ is the final volume of the extracted pigment (ml), $\boldsymbol{W}$ is the total weight of the dried pigment powder (g), and **0.175** is the extraction coefficient for carotenoid pigments.

The purification steps of pigment using column chromatography

After completing the extraction steps for the TID12 pigment (selected as the highly productive isolate), purification was performed using a column chromatography procedure. Silica gel (Merck, 20 g) was used, with ethanol serving as the dissolving agent. The crude extract was applied to a chromatography column with dimensions of 1.5 × 60 cm.

Fractions were eluted using ethyl acetate and subsequently dried through evaporation. To protect the light-sensitive pigments, all purification steps were carried out in complete darkness. The absorbance of the separated fractions was measured at 450 nm.

The purified fractions were stored at -20°C. To measure pigment absorption, the peak fraction of staphyloxanthin was combined [15].

Treatment steps of cancer cells by the purified pigment

As described in [16], after examining plates containing freshly prepared cells under an inverted microscope to ensure proper maturation, the following steps were carried out:

1. Preparation of Pigment Concentrations: To obtain pigment concentrations of 125, 250, 500, and 1000 µg/ml, sterile test tubes were used for serial one-half dilutions. All pigment dilutions were prepared immediately before the experiment. Staphyloxanthin doses were prepared by dissolving 0.01 g of purified pigment in 0.4 ml of DMSO solvent, followed by the addition of 10 ml of serum-free RPMI medium. This mixture was considered the initial 1000 µg/ml concentration. Serial dilutions were then prepared by transferring 5 ml from the 1000 µg/ml solution into subsequent tubes to achieve the desired concentrations.
2. Application to Culture Wells: After removing the transparent adhesive film, the culture media in each Falcon well was carefully removed. Then, 0.2 ml of each pigment concentration was added to approximately three wells per concentration. One designated column of wells served as a negative control, to which 0.2 ml of serum-free RPMI medium was added instead. All additions were performed as quickly as possible to maintain consistency, and the plates were resealed with adhesive film and gently swirled to ensure even distribution.
3. Incubation: All plates were incubated at 37°C for 24 hours, except for the Rat Embryo Fibroblast (REF) plate, which was incubated for 72 hours.

Staining steps of tissue culture plates

To determine the cytotoxic effect of staphyloxanthin on tumor cells, crystal violet staining was used, as described in [17]. The procedure was as follows:

1. Pigment Exposure and Staining: After a 24-hour period of pigment exposure on tumor cells, the contents of each well were emptied. Crystal violet solution (0.1 ml) was added to each well, and the plates were incubated for 30 minutes at 37°C.
2. Rinsing and Drying: After incubation, the crystal violet solution was removed, and any excess stain was gently washed away using water. This was

followed by rinsing with distilled water. The plates were then turned over and left to dry at room temperature.

3. Optical Density Measurement: The optical density (OD) of the crystal violet-stained cells was measured using an ELISA microplate spectrophotometer at 492 nm.
4. Inhibition Rate Calculation: The percentage inhibition rate (IR) was calculated based on the formula provided in [13].
5. $$Inhibition\ ratio\% = \frac{(\text{Optical density of control} - \text{Optical density of test})}{(\text{Optical density of control})} * 100\%$$

Statistical analysis was conducted on the optical density data to determine the pigment concentration required to reduce the viability of each cell line.

Result and discussion

Cultural characteristics

The colony morphology of the *S. aureus* isolates grown on blood agar base media, mannitol agar, and selective media revealed distinct cultural characteristics. These isolates appeared smooth, raised, glistening, and translucent, with varied pigmentation. Consistent with [18], the isolates exhibited *S. aureus* features, including cocci forms arranged in grape-like clusters, Gram-positive staining, and non-motile behavior.



Figure 1. Extraction of staphyloxanthin by using ethyl acetate and ethanol.

The ability of *S. aureus* isolates to produce staphyloxanthin was assessed by culturing the isolates on skim milk agar. Out of 52 isolates, only ten were found to produce staphyloxanthin. Among these, isolate TID12, obtained from a burn infection, demonstrated the highest productivity, with a measured value of 1.87.

The extraction of staphyloxanthin using ethyl acetate and ethanol yielded a highly concentrated product, with an absorbance of 0.628 at 450 nm. Figure 1 shows that the staphyloxanthin concentration produced by the selected isolate was 172.989 U/cell.

Staphyloxanthin treatment of cancer cell line

The CAL-51 cell line was treated with four concentrations of staphyloxanthin pigment over a 24-hour exposure period. The inhibition ratio was statistically significant ($p < 0.05$), as shown in Table 1 and Figure 2. The highest inhibition rate observed was 83% at a concentration of 1000 µg/ml, followed by 76% at 500 µg/ml, 73% at 250 µg/ml, and 70% at 125 µg/ml. In addition, the results indicated that the solvent DMSO had minimal or no impact on the tumor cells (Table 1).

Table 1.

Inhibition rate of CAL-51 tumor line when exposed at 24 hrs with the pigment.

Concentration ug/ml	Inhibitory concentration of pigment %	Inhibitory Concentration of the solvent %	X^2 :P /values
1000 Mg/ml	83%	22%	0.000
500 Mg/ml	76%	16%	0.000
250 Mg/ml	73%	13%	0.000125
125 Mg/ml	70%	6%	0.000

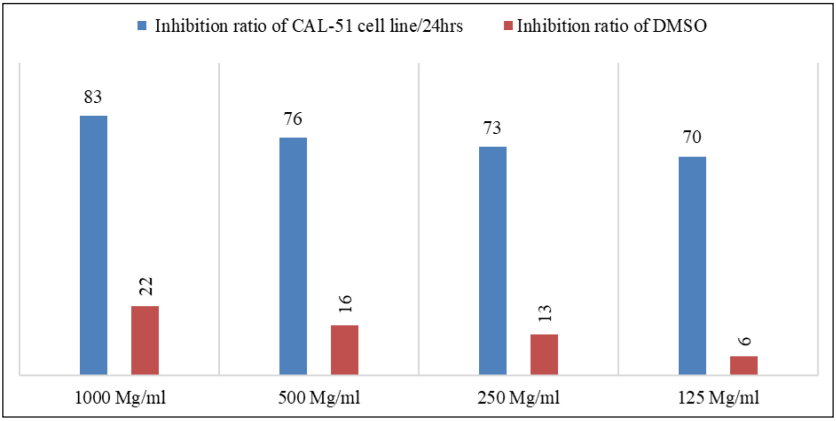


Figure 2. The inhibition rate of CAL-51 when exposed to pigment at 24 hours.

Effect of staphyloxanthin on normal (REF) cell line

The fourth concentration of staphyloxanthin pigment was applied to the REF normal cell line during a 72-hour exposure period. According to Table 2 and Figure 3, the inhibition ratio was found to be non-significant ($p > 0.05$). The inhibition rates were 25% at a concentration of 1000 µg/ml, 22% at 500 µg/ml, 19% at 250 µg/ml, and 17% at 125 µg/ml.

In addition, the data demonstrate that the solvent DMSO had no impact or only a minor effect on normal cells. For the four concentrations (1000 µg/ml to 125 µg/ml), the inhibition rates caused by DMSO alone were 12%, 8%, 7%, and 4%, respectively.

Table 2.

The inhibition rate to REF normal line when exposed to pigment at 72 hours.

Concentration Mg/ml	Inhibitory Concentration rate of pigment%	Inhibitory Concentration of DMSO solvent %	X^2 test:P value
1000 Mg/ml	25%	12%	0.67
500 Mg/ml	22%	8%	0.33
250 Mg/ml	19%	7%	0.18
125 Mg/ml	17%	4%	0.22

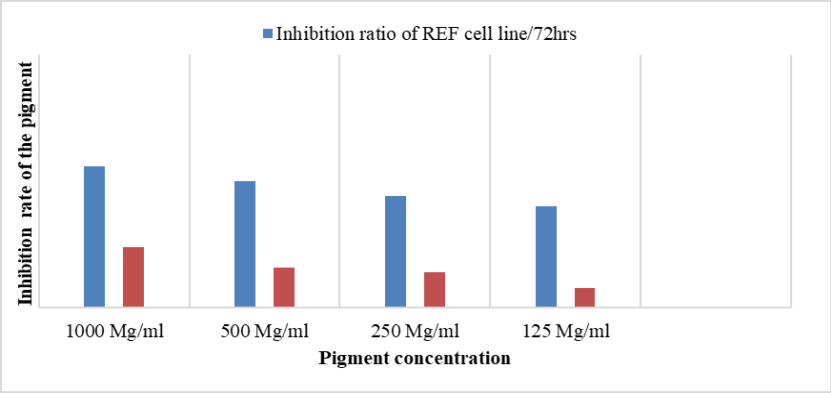


Figure 3. The Inhibition rate REF normal line when exposed to pigment at maximum time (72 hrs).

Discussion

The results of pigment production align with those reported in [19], which revealed that the total quantity of staphyloxanthin produced was 154.948 U/cell. Cytotoxicity assays were conducted to assess the pigment's anticancer effect, showing significant in vitro activity against various cancer cell lines.

Several studies have demonstrated the potent cytotoxic effects of staphyloxanthin. For instance, the crude form of staphyloxanthin extract exhibited significant cytotoxic activity, with an IC50 value of 841.3 μg/ml on the MCF7 breast cancer cell line [20]. Similarly, studies on lycopene treatment revealed a reduction in cell proliferation, with higher concentrations of carotenoid extracts leading to decreased viability. Lycopene was shown to inhibit the viability of the HepG2 liver cancer cell line by approximately 30% [21].

Another study [22] demonstrated that prodigiosin, a related pigment, exhibits its anticancer effects by inducing apoptosis in human choriocarcinoma (JEG3) and prostate cancer (PC3) cell lines, even at low concentrations. Furthermore, research has highlighted the broad in vitro anticancer activity of carotenoid pigments against four different cancer cell lines: Ehrlich ascites carcinoma (EAC), Dalton's lymphoma ascites (DLA), melanoma (B16F10), and adenocarcinomic human alveolar basal epithelial cells (A549 lung carcinoma). Interestingly, these pigments showed minimal cytotoxicity against non-cancerous human fibroblast cell lines (NIH3T3), with an IC50 value of approximately 52.24 μg/ml [23]. This suggests that staphyloxanthin could be a promising anticancer agent, capable of selectively targeting tumor cells while sparing normal cells like NIH3T3 and REF cell lines.

The anticancer properties of staphyloxanthin are likely linked to its antioxidant activity, attributed to its apocarotenoid structure, as discussed in [24]. This structure helps protect DNA and other biological molecules, such as lipids and proteins, from damage, which is critical in combating tumors. A study by [25] further emphasized that apocarotenoids, including staphyloxanthin, are strong antitumor agents and should be considered in cancer prevention programs and treatments for other severe diseases.

Moreover, studies have shown that staphyloxanthin has no adverse effects on REF cell lines, even after prolonged exposure of up to 72 hours, suggesting that the pigment does not induce physiological or structural changes in normal cells [26]. Another study [27] confirmed that the pigment lacks genotoxicity in tested ordinary cell lines, supporting its potential use in pharmaceutical development and future cancer treatment strategies.

Conclusion

The TID12 strain of *Staphylococcus aureus*, isolated from a burn infection, demonstrated a high pigment yield of 1.87. This strain's resilience to environmental stress allows it to colonize burns, attach to the site, replicate, and produce pigments in substantial quantities. The crude form of staphyloxanthin

pigment showed significant cytotoxic activity against the CAL-51 breast cancer cell line at various concentrations, ranging from 1000 µg/ml to 125 µg/ml. Higher concentrations exhibited greater cytotoxic effects compared to lower doses. Selecting a more precise diluted dose could help identify the optimal concentration required for effective treatment of cancer cells. The choice of these doses (1000, 500, 250, and 125 µg/ml) reflects natural antibiotic dosing regimens commonly used in medical practice.

The pigment exhibited no significant effect, or only a slight effect, on the normal REF cell line when compared to its impact on the CAL-51 cell line. This selective effect supports the potential of staphyloxanthin as a safe and effective treatment for cancer cells without harming normal cells.

In addition, the study demonstrated that the DMSO solvent had a negligible and non-significant effect on both cell lines (CAL-51 and REF). This finding highlights the suitability of DMSO as a solvent for the pigment in experimental therapeutic trials. Moreover, DMSO can be used to dissolve the pigment in later stages of purification. Future studies should focus on modifying the purification process to eliminate the use of classical solvents like ethanol and explore alternative solvents that enhance the extraction and stability of the pigment.

Conflict of interest information. All authors declare no conflict of interest.

Sponsorship information. This research was achieved upon personal initiative of the authors, without any support and contribution.

References

1. Lowy, F. D. (1998). *Staphylococcus aureus* infections. *New England Journal of Medicine*, *339*(8), 520–532. https://doi.org/10.1056/NEJM199808203390806
2. Rasigade, J. P., & Vandenesch, F. (2014). *Staphylococcus aureus*: a pathogen with still unresolved issues. *Infection, Genetics and Evolution*, *21*, 510–514. https://doi.org/10.1016/j.meegid.2013.08.018
3. Liu, G. Y., Essex, A., Buchanan, J. T., Datta, V., Hoffman, H. M., Bastian, J. F., Fierer, J., & Nizet, V. (2005). *Staphylococcus aureus* golden pigment impairs neutrophil killing and promotes virulence through its antioxidant activity. *The Journal of Experimental Medicine*, *202*(2), 209–215. https://doi.org/10.1084/jem.20050846
4. Clauditz, A., Resch, A., Wieland, K. P., Peschel, A., & Götz, F. (2006). Staphyloxanthin plays a role in the fitness of *Staphylococcus aureus* and its ability to cope with oxidative stress. *Infection and Immunity*, *74*(8), 4950–4953. https://doi.org/10.1128/iai.00204-06

5. Gupta, M., Mazumder, U. K., Kumar, R. S., & Kumar, T. S. (2004). Antitumor activity and antioxidant role of *Bauhinia racemosa* against Ehrlich ascites carcinoma in Swiss albino mice. *Acta Pharmacologica Sinica*, *25*, 1070–1076.
6. Ames, B. N., Shigenaga, M. K., & Hagen, T. M. (1993). Oxidants, antioxidants, and the degenerative diseases of aging. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *90*, 7915–7922. https://doi.org/10.1073/pnas.90.17.7915
7. Tanaka, T., Shnimizu, M., & Moriwaki, H. (2012). Cancer chemoprevention by carotenoids. *Molecules*, *17*, 3202–3242. https://doi.org/10.3390/molecules17033202
8. Baguley, B. C., & Leung, E. (2011). Heterogeneity of phenotype in breast cancer cell lines. In: *Breast Cancer — Carcinogenesis, Cell Growth and Signaling Pathways* (pp. 245–256).
9. Shirazi, F. H. (2011). Remarks in successful cellular investigations for fighting breast cancer using novel synthetic compounds. In: M. Gunduz & E. Gunduz (Eds.), *Breast Cancer — Focusing Tumor Microenvironment, Stem Cells and Metastasis* (pp. 85–102). Rijeka: InTech.
10. Gioanni, J., Le François, D., Zanghellini, E., Mazeau, C., Ettore, F., Lambert, J. C., Schneider, M., & Dutrillaux, B. (1990). Establishment and characterisation of a new tumorigenic cell line with a normal karyotype derived from a human breast adenocarcinoma. *British Journal of Cancer*, *62*(1), 8–13. https://doi.org/10.1038/bjc.1990.219
11. Charafe-Jauffret, E., Ginestier, C., Monville, F., Finetti, P., Adelaide, J., Cervera, N., Fekairi, S., Xerri, L., Jacquemier, J., Birnbaum, D., & Bertucci, F. (2006). Gene expression profiling of breast cell lines identifies potential new basal markers. *Oncogene*, *25*(15), 2273–2284. https://doi.org/10.1038/sj.onc.1209254
12. Marshall, J. H., & Wilmoth, G. J. (1981). Pigments of *Staphylococcus aureus*, a series of triterpenoid carotenoids. *Journal of Bacteriology*, *147*(3), 900–913. https://doi.org/10.1128/jb.147.3.900-913.1981
13. Pelz, A., Wieland, K. P., Putzbach, K., Hentschel, P., Albert, K., & Gotz, F. (2005). Structure and biosynthesis of staphyloxanthin from *Staphylococcus aureus*. *Journal of Biological Chemistry*, *280*(37), 32493–32498. https://doi.org/10.1074/jbc.m505070200
14. Tao, N., Gao, Y., Liu, Y., & Ge, F. (2010). Carotenoids from the peel of Shatian pummelo (*Citrus grandis* Osbeck) and its antimicrobial activity. *American-Eurasian Journal of Agricultural and Environmental Science*, *7*(1), 110–115. Retrieved from https://www.idosi.org/aejaes/jaes7(1)/17.pdf

15. Tong, S. Y., Davis, J. S., Eichenberger, E., Holland, T. L., & Fowler, V. G. Jr. (2015). *Staphylococcus aureus* infections: epidemiology, pathophysiology, clinical manifestations, and management. *Clinical Microbiology Reviews*, *28*(3), 603–661. https://doi.org/10.1128/CMR.00134-14. EDN: https://elibrary.ru/UOKFKF
16. Freshney, R. I. (2015). *Culture of animal cells: a manual of basic technique and specialized applications*. John Wiley & Sons.
17. Mather, J. P., & Roberts, P. E. (1998). *Introduction to cell and tissue culture: theory and technique*. Springer Science & Business Media.
18. Gao, S., Yu, B. P., Li, Y., Dong, W. G., & Luo, H. S. (2003). Antiproliferative effect of octreotide on gastric cancer cells mediated by inhibition of Akt/PKB and telomerase. *World Journal of Gastroenterology*, *9*(10), 2362–2368. https://doi.org/10.3748/wjg.v9.i10.2362
19. Missiakas, D. M., & Schneewind, O. (2013). Growth and laboratory maintenance of *Staphylococcus aureus*. *Current Protocols in Microbiology*, *28*(1), 9C-1–9C-5. https://doi.org/10.1002/9780471729259.mc09c01s28
20. Abdalgabar, F. A., Authman, S. H., & Khalaf, K. J. (2019). *Antibacterial and antitumor effect of staphyloxanthin produced by Staphylococcus aureus* (PhD thesis). Mustansiriyah University, College of Biology Science.
21. Teodoro, A. J., Oliveira, F. L., Martins, N. B., Maia, G. A., Martucci, R. B., & Borojevic, R. (2012). Effect of lycopene on cell viability and cell cycle progression in human cancer cell lines. *Cancer Cell International*, *12*, 36. https://doi.org/10.1186/1475-2867-12-36. EDN: https://elibrary.ru/RRIQJT
22. Li, D., Liu, J., Wang, X., Kong, D., Du, W., Li, H., Hse, C. Y., Shupe, T., Zhou, D., & Zhao, K. (2018). Biological potential and mechanism of prodigiosin from *Serratia marcescens* in human choriocarcinoma and prostate cancer cell lines. *International Journal of Molecular Sciences*, *19*(11), 3465. https://doi.org/10.3390/ijms19113465
23. Barretto, D. A., & Vootla, S. K. (2018). In vitro anticancer activity of staphyloxanthin pigment extracted from *Staphylococcus gallinarum*. *Indian Journal of Microbiology*, *58*(2), 146–158. https://doi.org/10.1007/s12088-018-0718-0. EDN: https://elibrary.ru/GBHYTK
24. Nisha, K., & Deshwal, R. (2011). Antioxidants and their protective action against DNA damage. *DNA*, *27*(28), 28–32.
25. Sharoni, Y., Linnewiel-Hermoni, K., Khanin, M., Salman, H., Veprik, A., Danilenko, M., & Levy, J. (2012). Carotenoids and apocarotenoids in cellular signaling related to cancer: a review. *Molecular Nutrition & Food Research*, *56*(2), 259–269. https://doi.org/10.1002/mnfr.201100311

26. Alsamaraie, A. F., Nadir, M. A., & Hussein, S. M. (2012). *Extraction and purification of prodigiosin from Serratia marcescens and study its effect on cancer cell lines* (MSc thesis). Institute of Genetic Engineering and Biotechnology, University of Baghdad.
27. Guryanov, I. D., Karamova, N. S., Yusupova, D. V., Gnezdilov, O. I., & Koshkarova, L. A. (2013). Bacterial pigment prodigiosin and its genotoxic effect. *Russian Journal of Bioorganic Chemistry*, *39*, 106–111. https://doi.org/10.1134/S1068162012060040. EDN: https://elibrary.ru/REYOYB

DATA ABOUT THE AUTHORS

Taif H. Hassan
Al-Karkh University of Science, College of Science, Microbiology Department
Baghdad, Iraq
Taif.h.salman91@kus.edu.iq
ORCID: https://orcid.org/0009-0007-3082-9353

Hanan A. Ali
Al-Karkh University of Science, College of Science, Microbiology Department
Baghdad, Iraq
hanan1974@kus.edu.iq
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9759-2553

Mohammed M. Sharba
Al-Karkh University of Science, College of Science, Microbiology Department
Baghdad, Iraq
Mohammed.mushtaq@kus.edu.iq
ORCID: https://orcid.org/0009-0004-7207-492X

Поступила 07.11.2024 Received 07.11.2024
После рецензирования 30.01.2025 Revised 30.01.2025
Принята 11.02.2025 Accepted 11.02.2025

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-4-1491 **EDN: VMUBIX**
УДК 614.2

CC BY NC ND

Научная статья

СИМУЛЯЦИОННОЕ ОБУЧЕНИЕ ВРАЧЕЙ И СТУДЕНТОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВИРТУАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ – ЭФФЕКТИВНЫЙ ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ МЕТАПРЕДМЕТНЫХ НАВЫКОВ И ПОИСКА АНТРОПОЦЕНТРИЧНЫХ ИНСАЙТОВ

И.А. Мизиев, А.В. Ахохова, Л.Д. Карданова, М.Х. Тлакадугова, М.В. Тлупова, А.Р. Бечелова, М.М. Тхабисимова, А.А. Медалиева, Н.М. Тхабисимова

Аннотация

Обоснование. Актуальностью научного исследования стало концептуальное переосмысление огромного потенциала и влияния на профессиональную подготовку студентов и трудовую деятельность медицинских работников инновационных методов, таких как нейронные сети, дополненные симуляцией и виртаульным онлайн-пространством.

В настоящей статье авторами рассмотрены возможности взаимодействия симуляционного контента с реальной потребностью обучающихся пользователей, что революционизирует обучение в сфере здравоохранения и делает его более привлекательным и эффективным.

Целью исследовательского вопроса стало обоснование применение симуляционных технологий обучения, в качестве инструмента для формирования метапредметных навыков и поиска антропоцентричных инсайтов с помощью персонализации процессов обучения врачей и студентов. Возможно, получение обратной связи от обучающихся (студентов, врачей-специалистов) станет связующим звеном для получение синергетических эффектов междисциплинарного подхода.

Материалы и методы. Для реализации целей, поставленной настоящей статьей была разработана анкета для анонимного опроса (Анкета обучающегося) на облачной платформе Google Диск для безопасного предоставления доступа студентов.

Опросник включал 5 вопросов с 5 вариантами ответов от «полностью согласен» до «полностью не согласен». Статистическая обработка проводилась при помощи Excel 2000 пакета Microsoft Office 2000 и с использованием статистических пакетов Statistica 6,0. Показатели стратифицировали с определением закономерностей распределения результатов.

Результаты. Для предварительной оценки влияния симуляционного обучения с применением виртуальных тренажеров и формирования ключевых вопросов анкеты обучающегося, авторами соотнести виды обратной связи с критериями ее эффективности для их формализации. Формализация подходов призвана детализировать и систематизировать подходы к процессам индивидуализации обучения врачей (студентов-медиков) для определения рационального перечня вопросов в анкете обучающегося в целях управления изменениями, сопровождающими внедрение симуляционных технологий в медицинской академии.

По анкетам обратной связи респондентов был определен результат подготовки и коэффициент удовлетворенности образовательными услугами по определённым шкалам. Итоги проведённого анкетирования студентов-медиков 6 курса (256) позволили сформировать практические рекомендации и рационализировать учебные процессы.

Заключение. Изложенное направлено на оптимизацию решения контекстных задач студентами в рамках симуляционных технологий, в том числе с использованием виртуальных тренажеров с ипользованием метапредметных навыков для нахождения антропоцентричных инсайтов на основе полученной обратной связи от обучающегося.

Ключевые слова: симуляционная реальность; симуляция; антропоцентричный инсайт; синергетика; системный подход; персонализация; метапредметный подход; обратная связь; контекстная задача

Для цитирования: Мизиев, И. А., Ахохова, А. В., Карданова, Л. Д., Тлакадугова, М. Х., Тлупова, М. В., Бечелова, А. Р., Тхабисимова, М. М., Медалиева, А. А., & Тхабисимова, Н. М. (2025). Симуляционное обучение врачей и студентов с применением виртуальных технологий – эффективный инструмент для формирования метапредметных навыков и поиска антропоцентричных инсайтов. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(4), 417-446. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-4-1491

Original article

SIMULATION TRAINING FOR DOCTORS AND STUDENTS USING VIRTUAL TECHNOLOGIES IS AN EFFECTIVE TOOL FOR DEVELOPING META-SUBJECT SKILLS AND SEARCHING FOR ANTHROPOCENTRIC INSIGHTS

I.A. Miziev, A.V. Akhokhova, L.D. Kardanova, M.Kh. Tlakadugova, M.V. Tlupova, A.R. Bechelova, M.M. Tkhabisimova, A.A. Medalieva, N.M. Tkhabisimova

Abstract

Background. The relevance of scientific research has become a conceptual rethinking of the enormous potential and impact on the professional training of students and the work activity of medical workers of innovative methods, such as neural networks, complemented by simulation and online virtual space.

In this article, the authors consider the possibility of interaction of simulation content with the real needs of learning users, which will revolutionize training in the healthcare sector and make it more attractive and effective.

The **purpose** of the research question was to substantiate the use of simulation learning technologies as a tool for the formation of meta-subject skills and the search for anthropocentric insights by personalizing the learning processes of doctors and students. Perhaps receiving feedback from students (students, medical specialists) will become a link to obtain the synergistic effects of an interdisciplinary approach.

Materials and methods. To achieve the goals set by this article, a questionnaire for an anonymous survey (Student Questionnaire) was developed on the Google Drive cloud platform to securely provide access to students. The questionnaire included 5 questions with 5 answer options from "completely agree" to "completely disagree." Statistical processing was carried out using Excel 2000, Microsoft Office 2000 and statistical packages Statistica 6.0. The indicators were stratified to determine the patterns of distribution of results.

Results. For a preliminary assessment of the impact of simulation training using virtual simulators and the formation of key questions in the student's questionnaire, the authors correlate the types of feedback with the criteria of its effectiveness for their formalization.

The formalization of approaches is intended to detail and systematize approaches to the processes of individualization of training for doctors (medical students) to determine a rational list of questions in the student's questionnaire in order to manage the changes accompanying the introduction of simulation technologies in the medical academy.

Based on the respondents' feedback questionnaires, the result of the training and the rate of satisfaction with educational services were determined on certain scales. The results of the survey of 6th year medical students (256) made it possible to formulate practical recommendations and streamline educational processes.

Conclusion. The above is aimed at optimizing the solution of contextual problems by students within the framework of simulation technologies, including the use of virtual simulators using meta-subject skills to find anthropocentric insights based on feedback received from the student.

Keywords: simulated reality; simulation; anthropocentric insight; synergetics; systems approach; personalization; meta-subject approach; feedback; context task

For citation. Miziev, I. A., Akhokhova, A. V., Kardanova, L. D., Tlakadugova, M. Kh., Tlupova, M. V., Bechelova, A. R., Tkhabisimova, M. M., Medalieva, A. A., & Tkhabisimova, N. M. (2025). Simulation training for doctors and students using virtual technologies is an effective tool for developing meta-subject skills and searching for anthropocentric insights. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(4), 417-446. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-4-1491

Введение

Доступность и увлекательность медицинских дисциплин в современном образовании, где знания непрерывно совершенствуются, являются важными элементами антропоцентризма врача и студента.

С другой стороны, технологичность и интеграция научных достижений в образовательной среде, умение использовать арсенал передовых методик, основанных на симуляционных технологиях обучения, позволяют расширить методологические и практические навыки в рамках подготовки врачей и студентов медицинских вузов.

Принимая во внимание, что знание фундаментальных и клинических дисциплин лежат в основе многих взаимоувязанных технологических процессов и являются ключевыми факторами, влияющими на развитие здравоохранения и качества предоставляемых медицинских услуг, ценность приобретают метапредметные способности (навыки переработки информации, теоретическое, творческое, критическое, мышление, его качество).

Использование в процессе обучения студентов и врачей активных и интерактивных методов обучения раскрывает интеллектуально-творческий потенциал, что является обязательным условием эффективной реализации компетентностного подхода [24].

Многообразие работ, посвященных использованию современных симуляционных технологий, в том числе с использованием виртуальных тренажеров свидетельствуют о расширении горизонтов обучающихся, способствуя прежде всего развитию личностного потенциала в условиях трансформации в сфере здравоохранения [20; 23; 24; 27; 30].

Актуальностью научного исследования стало концептуальное переосмысление огромного потенциала и влияния на профессиональную подготовку студентов и трудовую деятельность медицинских работников инновационных методов, таких как нейронные сети, дополненные компьютерной моделью реальности и наглядным онлайн-пространством.

В настоящей статье авторами рассмотрены возможности взаимодействия симуляционного контента с использованием виртуальных технологий с реальной потребностью обучающихся пользователей, что революционизирует обучение в сфере здравоохранения и делает его более привлекательным и эффективным.

В контексте изложенного, по мнению исследователей, главной задачей стало нахождение и внедрение оптимизирующих моделей, обеспечивающих содержательное информационно-коммуникационное пространство в учебной среде, посредством анкетирования обучающихся для реализации метапредметного подхода в высшем медицинском образовании.

Метапредметное содержание как понимание, разотождествлено с общенаучной деятельностью и одновременно надпредметно и рефлексивно по отношению к предметности. По-видимому, данное обстоятельство инициирует исследовательское стремление и компетентность студентов-медиков и врачей, повышая профессиональную мобильность, квалификацию, продуктивность в основной деятельности.

Одним из методов является персонализированный подход в образовании, в котором обучающийся выступает *субъектом* учебного процесса, что в корне трансформирует парадигму образования. Саморегулирование и адаптация образовательного процесса с использованием симуляционного контента к пользовательским потребностям и базовым (приобретенным) компетенциям врачей и студентов, создает дополнительные условия для эффективного и интересного обучения [30].

Исследования, посвященные особенностям использования симуляционного контента по изучению дисциплин в области естествознания [7], практический опыт работы в медицинском вузе, анкетирование студентов и преподавателей, результаты контрольных мероприятий свидетельствуют, что обучающиеся сталкиваются с проблемами в нахождении способов для решения стоящих задач, имеющих профессиональную фабулу, и соответственно применению навыков из различных дисциплин, входящих в один базовый модуль.

Возможно, используя принципы синергетического подхода - открытости процесса обучения, его нелинейности и неустойчивости (динамичности) [8; 9; 29] станет ясна ориентация обучающегося на самообучение через овладение основополагающими методами познания, которые обосновывают необходимость использования потенциала симуляционных методов с использованием виртуальных технологий.

Симуляционные методы обучения не только способствуют повышению социально-психологической компетентности будущих врачей, они активизируют процессы коллективной социализации, трансформации и инициируют переход к самообучению, *самоопределению индивидуального стиля деятельности*. Таким образом, субъект обучения определяет в самом себе объект влияния и преобразуется его в субъект самообучения.

Следовательно, вопросы понимания неопределенностей и формирования навыков исследовательской компетентности студентов-медиков в контексте внедрения симуляционных технологий для получения метапредметных навыков детерминированы с вышеизложенными обстоятельствами и становятся актуальным предметом для изучения.

Целью исследовательского вопроса стало обосновать применение симуляционных технологий обучения, в качестве инструмента для формирования метапредметных навыков и поиска антропоцентричных инсайтов с помощью персонализации процессов обучения врачей и студентов. Возможно, получение обратной связи от обучающихся (студентов, врачей-специалистов) по результатам анкетирования станет необходимым условием для получение синергетического эффекта, междисциплинарного подхода.

Подцелью явилась возможность оценки надпрофессиональных «гибких» навыков «soft skills» непосредственно связанных с индивидуальными особенностями врача-специалиста (студента), которые в любой профессии определяются как критически важные элементы, определяющие индивидуальную прогностическую успешность специалиста в отрасли.

Материалы и методы

Симуляционное обучение студентов и врачей осуществляется в формате симуляционных тренингов с использованием виртуальных тренажеров на базе аккредитационно-симуляционного центра, созданного на кафедре виртуально-симуляционных и информационных технологий в медицине медицинской академии Кабардино-Балкарского государственное университета им. Х.М. Бербекова, г. Нальчика (далее – кафедра, медицинская академия).

Инфраструктура симуляционного центра разделена на две зоны, предназначенные для проведения экспертного контроля и образовательного процесса. Для оптимизации процесса обучения реализована возможность получения навыков в раздельных блоках: реанимационном, эндоскопическом, акушерско-гинекологическом, неотложной и скорой медицинской помощи, хирургическом, сестринского дела.

Контингентом обучающихся являются: студенты и выпускники 6 курса медицинской академии, получающие первичную специализированную аккредитацию и врачи-специалисты, проходящие второй этап аккредитации.

На базе кафедры медицинской академии осуществляется реализация и отработка алгоритмов ведения пациентов, с помощью виртуальных моделей больных, проведение манипуляций при различных клинических сценариях по нескольким специальностям (анестезиология-реаниматология, хирургия, неотложная и скорая медицинская помощь, и др.). Для проработки практических навыков общения и взаимодействия с объектом, в наличии есть 2 экранных симулятора виртуального пациента, 10 планшетов и более 20 очков виртуальной реальности (КБР, г. Нальчик, ул. Горького, 5, 1 этаж).

В рамках предмета изучения статьи проанализирована литература с 2018 по 2023 г., размещенная в базах данных PubMed и Web of Science, по ключевым словам, «симуляционные технологии», «образование», «междисциплинарный подход», «виртуальная реальность», «цифровые двойники».

Для реализации целей, поставленной настоящей статьей была разработана анкета для анонимного опроса (Анкета обучающегося) на облачной платформе Google Диск для безопасного предоставления доступа студентов. Опросник включал 5 вопросов с 5 вариантами ответов от «полностью согласен» до «полностью не согласен». Статистическая обработка проводилась при помощи Excel 2000 пакета Microsoft Office 2000 и с использованием статистических пакетов Statistica 6,0. Показатели стратифицировали с определением закономерностей распределения результатов.

Из целевой аудитории студентов 6 курса - 656 человек, в выборку попали - 256 респондентов. Критериями отбора стала личная заинтересованность студентов 6 курса участия в анкетировании, мотивированное возможностью получения дополнительного интерактивного урока по любой дисциплине.

Данное исследование рассматривалось и обосновывалось в контексте проблемы антропологических, аксиологических, личностно ориентированных подходов. Использовались методы анализа, конкретизации, сравнения, обобщения.

Результаты и обсуждения

Индивидуализация процессов обучения врачей (студентов-медиков) направлена на решение контекстных задач и поиск антропоцентричных инсайтов посредством симуляционных и виртуальных методов обучения.

В нынешних реалиях понятие «персонализация», наряду с синонимичными понятиями «персонификация» и «кастомизация», используются в значениях «адаптация (юзабилити) услуги под конкретного потребителя», «приоритетность интересов пользователя» и т.д. Процессы персонализации в образовании является одним из принципов обучения и подразумевают ориентацию преподавателя на составляющие качественных характеристик обучающегося [22].

Для оценки данной значимости исследователи апеллировали к Российской теории персонализации личности А.В. Петровского [19], которая раскрывает «…психологические особенности личности, её стремления, неопределенности, степень осознанности, организованности, итоговую результативность, для решения соответствующих жизненных задач», помогает в формировании исследовательской компетентности студента и определяет потенциал самореализации личности в условиях цифровизации сферы здравоохранения.

Для понимания *динамики сложности сознания* (обучающегося), которое обладает спонтанностью, глубоко индивидуальной и ситуативной самопроизвольной активностью, необходимо неразрывная связь познания с действием [11]. «Любой акт деятельности означает *изменение среды и изменение от среды»* [12], и познание дает практическую возможность изучить и понять чрезвычайно важные закономерности систем с многоконтурной нелинейной обратной связью, складывающиеся между: субъектом познания, деятельностью и средой его активности.

Ввиду этого современные методологические исследования [23; 24; 27; 31] отмечают впечатляющий результат от использования контекстного (си-

туационного) обучения в медицине в целях совершенствования исследовательской деятельности студентов. Поэтому, интеграция симуляционного обучения должна активно использоваться в медицинских вузах, для применения полученных навыков на рабочем месте.

Ситуативность и проблематика, характерные признаки симуляционных тренингов, которые несут контекстные задачи разных научных дисциплин в медицине и содействует образованию целостной системы универсальных знаний, умений, навыков для выделения в структуре основополагающих компетенций, определяющих квалифицированную подготовку студента и врача.

Поскольку ценность настоящего обучения должна эволюционировать на выявлении и реализации внутреннего потенциала, обучающегося по отношению к себе со средой взаимодействия (рефлексия совместной деятельности) [23], то синергетический подход усиливает эффективность обучения в результате интеграции, слияния разрозненных знаний различных дисциплин в единую систему посредством системного подхода (эмерджентности).

Как отмечено, исследователем [24] самым оптимальным путем от самообучения и самообразования до повышения компетентности специалистов являются интерактивные (симуляционные, виртуальные) методы обучения.

Они призваны оптимизировать рабочие процессы, автоматизировать и оптимизировать рутинные задачи и ресурсы, позволяют принимать обоснованные решения, помогает прогнозировать и обрабатывать информацию выделяя ключевые инсайты.

Вместе с этим важное значение приобретает развитие у врачей и студентов-медиков универсальных междисциплинарных и наддисциплинарных умений и навыков. В медицине формирование компетентностного подхода в рамках, действующих ФГОС ВО возможно при реализации метапредметных навыков. Заданные умения в настоящее время является основой образовательных процессов [24], которые определяют ориентиры и прогнозы совершенствования такой образовательной формы, как учебный предмет и занятие [3; 17; 23].

Для эффективной и проактивной интеграции информационно-коммуникационных методов в высшей школе обучения необходимы рационализаторские идеи и инновационные модели, позволяющие эффективно применять данные технологии в вузовском обучении [21; 28]. Синхронизация процессов анкетирования обучающихся позволит оценить триггерные точки влияния.

Одновременно данные технологии не могут быть заимствованы и интегрированы в учебную среду бессознательно. Поэтому в целях адекватной имплементации в образовательный процесс, предварительной оценкой обеспечения развития личностного потенциала и компетенции обучающихся [28], является их самореализация, оценённая по результатам обратной связи.

Вместе с тем, возникающие противоречия между возрастающей потребностью обучающихся в самоопределении целей и задач, ориентирах, технологичности процессов с одной стороны и строгой регламентацией организации использования информационно-коммуникационных, симуляционных процессов с другой, свидетельствуют об отсутствии достаточной методологической основы для реализации идеи персонального образования [22; 28].

Поэтому необходимость применения междисциплинарного методологического подхода к проблеме реализации идеи персонализации в образовании остается крайне востребованной, так как позволит обогатить обучающегося не только знаниями теоретического контента, но и осознанием собственных когнитивных способностей (метапредметных) (рис. 1).

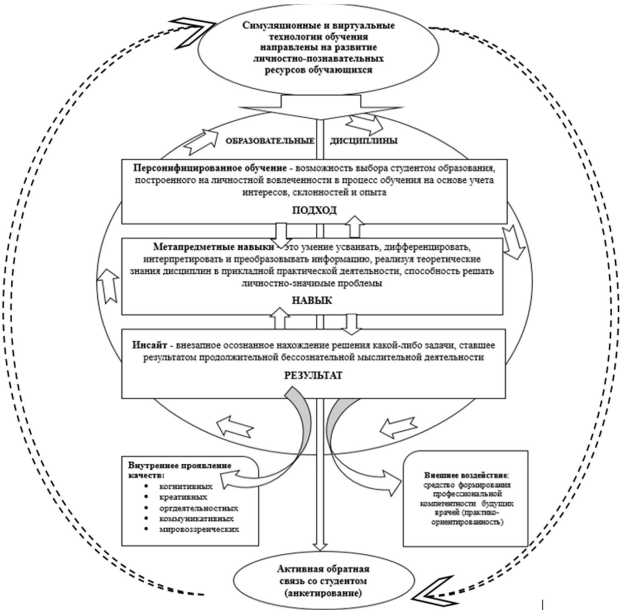


Рис. 1. Модель взаимосвязей и зависимостей подходов в обучении, при использовании симуляционных и виртуальных технологий обучения для получения инсайта и проявления личностных качеств обучающегося

Данная модель призвана визуализировать использование подходов персонализации в обучение, что делает возможным получение инсайта через осознанность метапредметных навыков. Инсайт в свою очередь становится поводом для продолжения обучения. При этом формирование и получение инсайтов у обучающегося, в случае извлечения самостоятельных выводов, помогает структурировать личный опыт, однозначно повышая уровень эмпатии и глубины понимания предметной области и задает практико-ориентированность.

Из рис. 1 видно, что метапредметность по сути является пронизывающей линией, проходящей через весь образовательный контент, каждый раз итеративно получая «приращение» в конкретном преломлении, и объединяя в единое и целостное содержание изучаемые дисциплины. «Элементы метапредметного содержания призваны определять системообразующую основу общего образования, как по вертикали отдельных ступеней обучения, так и на уровне горизонтальных межпредметных связей…» [16; 25].

Методологическое обоснование необходимости внедрения идеи персонализации в учебную сферу, предписывает потребность в обеспечении конгруэнтной имплементации современных симуляционных технологий обучения для развития личностно-познавательных ресурсов обучающихся (студентов-медиков, врачей) для повышения возможностей для самореализации.

Формализация подходов и постоянное итеративное совершенствование процессов обучения студентов-медиков с применением симуляционных и виртуальных технологий задает ориентиры на осознанный выбор профессии.

Моделирование медицинских манипуляций, в том числе в чрезвычайных ситуациях в симуляционной среде обучения дает оценку уровню осознанности (врача, студента-медика) применения профильных знаний логического характера, умению пользователя применять современные технологии для сбора, хранения, преобразования и передачи баз данных с помощью виртуальных технологий.

В настоящее время эффективным методом повышения квалификации врачей-специалистов стало применение симуляционных технологий, предполагающих использование виртуальных тренажеров [2].

Спектр возможностей виртуальных симуляций обширен, и позволяет совершенствовать мастерство, отшлифовывать технику, развивая умения в безопасной среде. Так, продумывание плана операций, с использованием детализированной трехмерной модели анатомии виртуального пациента

позволяет оценивать степень совершенствования базовых навыков будущим врачам-хирургам не зависимо от профильности, при обучении с помощью виртуального хирургического симулятора с тактильной обратной связью [25; 31].

Построение симуляций, интерактивное обучение, сопоставление сценариев в виртуальной реальности позволяет воспроизводить различные образовательные ролевые сценарии при моделировании операций и иных процессов, обеспечивает практическое обучение студентов, улучшает профессиональные практические навыки. Примером является платформа Zepeto, работающая с 2018 г., которая формирует улучшенную реальность и 3D-технологии для общения с другими пользователями [29; 32].

Для оценки достижения целей, установленных настоящей статей необходим методологический фундамент, с помощью которого возможна оценка выражения индивидуальности личности обучающегося через активную деятельность в образовательной среде, путем оценки активной обратной связи (анкетирования). Персонифицированная медицина должна начинаться с персонализированной подготовки студента-медика, будущего врача и оценки его метапредметных возможностей.

Для предварительной оценки влияния симуляционного обучения на повышения качества профессионального образования обучающихся, авторами разработана таблица, позволяющая соотнести *виды активной* обратной связи с *критериями* ее эффективности [5; 22] для формирования ключевых вопросов анкеты обучающегося (табл. 1).

Таблица 1.

Соотнесение видов обратной связи с критериями ее эффективности для формирования ключевых вопросов анкеты обучающегося

Виды обратной связи	**Критерии эффективности обратной связи** [29]				
	своевременность	уважение	конкретность	направленность	внимательность
Формальная	+/-	+	+	+	+
Неформальная	+	+	+	+	+
Конструктивная	+	+	+	+	+
Оценочная	+	+	+	+	+

Рассматривая виды обратной связи авторами поочередно соотнесены виды с критериями ее эффективности для направленного поиска при формировании вопросов анкеты обучающегося, в целях совершенствования взаимодействия [14; 29]. Нижеуказанное свидетельствует о важности каж-

дого критерия не зависимо от вида обратной связи, соответственно равнозначности и валидности поставленных вопросов для обучающихся.

Формальный вид связи носит ретроспективный характер, то есть она осуществляется «систематическим преднамеренным образом», на основе уже запланированного мероприятия вне клинической области и носит оценочный характер. Поэтому критерий *своевременности*, в контексте целей исследования настоящей статьей, к ней не соотносим, следовательно, формирования вопросов о времени не актуально [1; 4; 15; 18].

Вместе с тем, для *неформального вида обратной связи* вопрос *своевременности* приобретает особую значимость и становится ценным, потому что дает возможность разотождествления с запланированной и управляемой деятельностью, делая ее надпредметной и рефлексивной по отношению к предметности. Данное обстоятельство (ограниченность и не запланированость) инициировало вопрос в анкете для обучающегося:

1. Отведенного времени было достаточно для отработки навыков общения с пациентом в симулированных условиях?

Суть *конструктивной обратной связи* заключается в анализе конкретных действий всех членов команды, участвующих в воплощении клинического сценария, без личностной оценки обучающегося. Приоритетными являются все критерии – *своевременность, уважение, конкретность, направленность и внимание*.

Поэтому активная обратная связь должна быть ориентирована на личностные особенности обучающегося, так как в перспективе способна оказать негативное влияние на эффективность и производительность труда, снизить уверенность в выполнении ситуативных текущих задач. Следовательно, очередным вопросом в анкете стал:

2. Вы испытывали сильное психоэмоциональное напряжение (стресс) при оценке практических навыков (умений) в симулированных условиях (особенно при первых самостоятельных манипуляциях)?

С точки зрения критерия *конкретности,* в рамках анализа конструктивной обратной связи, общие заявления не допустимы в качестве основы для улучшения, так как суть критерия связана с конкретной ситуацией или задачей для члена команды. На основании этого обучающийся, принимающий обратную связь, способен оптимизировать свою производительность, учитывая конкретные действия. Следовательно, следующим вопросом в анкете обучающегося стал:

3. Симуляционное обучение улучшило освоение полученных умений и навыков при использовании виртуальных тренажеров, и(или) манекенов?

Конструктивный «фидбек», который является априорным элементом связи, задает *направленность* в работе обучающегося для повышения уровня эффективности решения задач, что прогностически должно предотвращать возникновение проблем. Обратная связь должна (может) содержать предложения об альтернативных решениях.

Еще одним критерием эффективности конструктивной обратной связи является *внимательность*. Важность данного критерия имеет двойственный характер и может быть рассмотрена как в качестве *метапредметного* навыка в контексте прогнозируемости врачебной ошибки, так и – способе, форме получения информация об аспектах обучения (проявлении эмпатии при сообщении отрицательных эффектов). Вопросом в анкете стал:

4. Участие тренера во время проведения симуляционного тренинга с применением виртуальных тренажеров помогало решать задачи, поставленные клиническим сценарием?

Изложенное свидетельствует, о необходимости оценки нетехнических навыков (когнитивные, социальные и личностные ресурсы обучающегося). Данные навыки априорные, и позволяют оценить ситуативную адаптивность индивида, оперативность принятия решений, коммуникативные и лидерские способности специалиста, стрессоустойчивость.

Таким образом, ответы на вопросы анкеты с оценкой метапредметных компетенций, полученные в ходе освоения тренингов, применяемых как в рамках образовательного процесса, так и в конкретных обстоятельствах, учитывают нетехнические навыки индивида. Данное обстоятельство способно выявить риски и определить резерв для нивелирования негативных последствий воздействия факторов ятрогенного характера (человеческий фактор).

Рассуждая об *оценочном виде обратной связи*, который перекликается с формальным и имеет ретроспективный характер необходимо, чтобы обучающийся получил и ответил по чек-листу, а тренер оценил заполненную анкету обратной связи. Следует подчеркнуть, что вопросы анкеты, которые сформированы на основании процессов обучения студентов-медиков и направлены на решение контекстных задач должны итеративно подвергаться переосмыслению, переструктурированию, во избежание фрагментарности.

Разработка и воплощение новых сценариев клинического симуляционного тренинга способствует рождению внутренних конфликтов, нестыковок, противоречий. Инсайт происходит именно в критических моментах, случаях, когда формальные решения сталкиваются с новой, необычной ситуацией и внезапное осознанное нахождение решения какой-либо за-

дачи становится поводом для обучения. Поэтому следующим вопросом в анкете обучающегося стал:

5. Вам удавалось найти необычное решение, отличное от тривиального, поставленного контекстной задачей клинического сценария?

Формализация подходов детализирует подходы к процессам индивидуализации обучения студентов-медиков. В рамках исследования авторы стремились систематизировать подходы для определения рационального перечня вопросов в Анкете обучающегося для последующего управления изменениями, сопровождающего внедрение симуляционного обучения с применением виртуальных технологий в медицинской академии.

Активная обратная связь со студентами-медиками осуществлялась посредством анкет для анонимного опроса (Анкета обучающегося), размещенных на облачной платформе Google Диск. Для раскрытия метапредметного потенциала обучающегося и совершенствования, коррекции учебного процесса с применением симуляционных и виртуальных технологий использовались открытые вопросы, оцененные по шкале Лайкерта [10; 13; 30].

В качестве опросника использовалась анкета с открытыми вопросами из 2 части статьи, имеющая ряд преимуществ, позволяющая эффективно синтезировать информацию путем детальной оценки понимания студентами-медиками задачи, выбранной позиции, личной вовлеченности в процесс, его управляемости, что расширяло границы диалога для высказывания мнений, мыслей и чувств (ориентир мотивации в обучении).

Авторами была использована классическая шкала Лайкерта состоящая из пяти оценок [6, 26]: полностью согласен – 5 баллов; согласен – 4 балла; частично согласен – 3 балла; частично не согласен – 2 балла; полностью не согласен – 1 балл. Положительное отношение студента к вопросу кодируется большим числом (5 баллов), а негативное – меньшим (1 балл).

Анкета обучающегося содержала следующие вопросы (табл. 2).

Перейдя по ссылке на облачную платформу Google Диска студенты медики 6 курса в предлагаемой анкете могли ставить отметки в виде «+», что позволяло однозначно определить их отношение к вопросу. Выбраковки анкет, из-за некорректного заполнения ячеек, не было. Завершение анкетирования было возможным только при заполнении ячейки (от 1 до 5) по каждой строке анкеты, внесение двух вариантов ответов было исключено.

По результатам проведенного анкетирования была получена сводная таблица данных. В силу невозможности размещения полной таблицы в статье, исследователями показана только ее часть (табл. 3).

Таблица 2.

Анкета обучающегося

№ п/п	Вопрос	Ответ					Комментарий
	Балл	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	
	ФИО, обучающегося	**абсолютно не согласен**	**не согласен**	**затрудняюсь ответить**	**согласен**	**абсолютно согласен**	
1	Отведенного времени было достаточно для отработки навыков общения с пациентом в симулированных условиях						
2	Вы испытывали сильное психоэмоциональное напряжение (стресс) при оценке практических навыков (умений) в симулированных условиях (особенно при первых самостоятельных манипуляциях)						
3	Симуляционное обучение улучшило освоение полученных умений и навыков при использовании виртуальных тренажеров, и(или) манекенов						
4	Участие тренера во время проведения симуляционного тренинга с применением виртуальных тренажеров помогало решать задачи, поставленные клиническим сценарием						
5	Вам удавалось найти необычное решение, отличное от тривиального, поставленного контекстной задачей клинического сценария						

Таблица 3.

Сводная таблица результатов (обработка анкеты обучающегося)

студенты	Отзыв 1	Отзыв 2	Отзыв 3	Отзыв 4	Отзыв 5	Общий балл
1	2	1	5	5	5	18
2	3	2	4	4	4	17
3	3	3	5	4	5	20
4	2	2	4	3	2	13
5	2	2	4	4	3	15
…						
…						
265	3	2	4	2	3	14
Всего:	876	785	1867	988	1112	5628

Результат в баллах суммируется по всем отзывам. Итоговый суммарный балл позволяет дать характеристику позициям студентов по исследуемой тематике.

Статистическая обработка результатов была направлена на построение таблицы сопряженности, на основе которой рассчитывался коэффициент корреляции по каждому отзыву. В табл. 3 представлены результаты расчёта по отзыву 1 – «Отведенного времени было достаточно для отработки навыков общения с пациентом в симулированных условиях». Аналогичным образом рассчитываются показатели сопряжённых таблиц по отзывам 2 - 5.

Следующий этап расчет коэффициентов корреляции Спирмена в Excell для каждого отзыва, с формированием выводов. Расчет производится по формуле ранговой корреляции Спирмена:

$$\rho = 1 - \frac{6 \cdot \sum_{i=1}^{n} d_i^2}{n(n^2-1)}, \quad (1)$$

Таблица 4.

Составление сопряженной таблицы по отзыву 1

студент	Общий балл, So	Балл отзыва, Sb	Разность баллов, So-Sb	Ранг, Sb	Ранг разности, So-Sb	Разность рангов, d	Квадрат разности рангов, d2
1	18	5	13	8	19	-11	121
2	17	4	13	33	19	14	196
3	20	5	5	8	4	4	16
4	13	2	11	71	60	11	121

5	15	3	12	59	39,5	19,5	380,25
…							
…							
265	14	2	13	71	39,5	31,5	992.25
Всего:	5628	876					87345,76

Результаты расчета коэффициентов представлены в табл. 5.

Таблица 5.

Результаты расчета коэффициента Спирмена

№ п/п	Отзывы	Коэффициент rs
1	Отведенного времени было достаточно для отработки навыков общения с пациентом в симулированных условиях	0,35
2	Вы испытывали сильное психоэмоциональное напряжение (стресс) при оценке практических навыков (умений) в симулированных условиях (особенно при первых самостоятельных манипуляциях)	0,19
3	Симуляционное обучение улучшило освоение полученных умений и навыков при использовании виртуальных тренажеров, и(или) манекенов	0,76
4	Участие тренера во время проведения симуляционного тренинга с применением виртуальных тренажеров помогало решать задачи, поставленные клиническим сценарием	0,59
5	Вам удавалось найти необычное решение, отличное от тривиального, поставленного контекстной задачей клинического сценария	0,66

При использовании коэффициента ранговой корреляции условно принято оценивать силу зависимости между признаками следующим образом: $\rho<0,3$ слабая зависимость; $0,3\leq\rho<07$ умеренная зависимость; $\rho\geq0,7$ сильная зависимость.

На основании проведенного исследования установлено, что существует сильная связь для отзыва 3 - «Симуляционное обучение улучшило освоение полученных умений и навыков при использовании виртуальных тренажеров, и(или) манекенов» (значение коэффициента $rs = 0,76$).

Достаточно тесная связь между определенными исследователями мотивационными факторами и готовностью обучающихся к использованию симуляционного обучения с применением виртуальных тренажеров показал отзыв 5 - «Нахождение необычного решения, отличного от тривиального, поставленного контекстной задачей клинического сценария»

(значение коэффициента rs = 0,66) и отзыв 4 - «Участие тренера во время проведения симуляционного тренинга с применением виртуальных тренажеров помогало решать задачи, поставленные клиническим сценарием» (значение коэффициента rs = 0,59).

Вместе с тем, студенты отмечали, что симуляционные и виртуальные технологии необходимо использовать в комбинации с традиционными формами обучения, несмотря на эффективность метода, как средство и технология образования. Студенты-медики отметили, что неоднократное использование симуляционного обучения с применением виртуальных технологий в обучении улучшает показатели образной кратковременной памяти, наблюдательности, устойчивости, концентрации внимания, способности к обобщению и классификации, способствует повышению поленезависимости (когнитивный стиль).

Симуляционные и виртуальные лаборатории с искусственным интеллектом открывают уже совершенно новые горизонты для обучения студентов и врачей, содействуют развитию научных инноваций в отрасли.

Заключение

Выше изложенное обуславливает социальную значимость и необходимость формирования метапредметных навыков у студентов медицинских вузов в процессе их обучения с использованием симуляционных и виртуальных технологий, и вызвано необходимостью повышения научного потенциала современного российского медицинского образования.

Обратная связь, в виде анкетирования позволила частично оценить достаточность ресурсов медицинской академии и *нетехнические* (метапредметные) навыки обучающихся по пятибалльной шкале, которые в купе позволили сделать ряд практических выводов и дать рекомендации о необходимости:

- пересмотреть количество учебных часов, посвященных симуляционному обучению с использованием виртуальных тренажёров в программах оценки практических навыков в симулированных условиях,

- пересмотреть подходы и время оценки на входной контроль уровня подготовленности, проведения инструктажей, правил постановки целей и задач, (де)брифинга, что является важными компонентами влияния на эмоциональное и физическое состояние обучающегося,

- обеспечить организацию свободного доступа к симуляционным тренингам, тренажёрам, манекенам (учитывая разные нетехнические навыки обучающихся) для воплощения практических навыков, особенно у студентов,

- пересмотреть подходы к конструированию сценариев тренинга для достижения четко определенных результатов обучения, с учетом *персонифицированного подхода* (ситуативная адаптивность индивидуума, способность оперативно принимать решения, коммуникативность и стрессоустойчивость). Данный показатель в соответствие с Анкетой обучающегося оказался в диапазоне слабой зависимости – 0,19,

- определить направленность педагогического контроля (мотивационного, корригирующего, управляющего и оценочного) который определит роль и долю участия тренера (преподавателя) при прохождении симуляционного обучения с использованием виртуальных тренажеров.

Все вышеперечисленное возможно будет стимулировать достижение инсайта, который является ключевым элементом эксперимента и применения нестандартных решений при воплощении разных клинических сценариев тренинга. Значимость инсайта при оценке когнитивных особенностей обучающихся, обнаруживающихся при персонификации процессов обучения студентов и врачей является бесспорным.

Результаты опроса, были направленны в том числе на установление мотивационных факторов с использованием шкалы Лайкерта, что позволило определить важные причины для студентов, использующих симуляционные методы обучения с применением виртуальных технологий.

Анализ корреляционной зависимости и установление взаимосвязи конкретного вопроса с общим показателем по всем опрошенным респондентам подтвердил значимость и важность персонализация процессов обучения, которая заключается в понимании преподавателями побудительных мотивов студентов, получающих высшее медицинское образование, для приложения усилий, направленных на поддержание вовлеченности студентов в образовательный процесс, удержания мотивации и ее дальнейший рост.

Следовательно, практическими рекомендациями должны стать постоянный мониторинг результатов анкетирования и формализация подходов при формирования ключевых вопросов анкеты обучающегося для итеративного внесения изменений в их содержания. Возможности самостоятельной записи обучающихся посредством возможностей сайта симуляционного центра для отработки практических навыков, закреплении полученного материала и(или) ознакомлении с новыми манипуляциями.

Концепция и технология симуляционного обучения позволяют раскрыть не только принципы написания сценариев и проведения симуляционных тренингов, но и систематизировать подходы, проработать психологические навыки, для соответствия профессиональными стандартами у обучающихся.

Усиление интеграции симуляционных технологий в медицинском сообществе открывает возможности осуществления студентами, врачами применения полученных навыков по анализу и прогнозированию развития различных явлений (состояний) без осуществления фактического эксперимента.

Нормативное правовое регулирование и совокупность обязательных требований при реализации основных образовательных программ высшего образования, представленных в рабочих ФГОС ВО закрепляют исследовательскую деятельность будущего врача в качестве одного из основных видов профессиональной деятельности.

Научно-исследовательская работа студента-медика, направленная на методический поиск, исследования, эксперименты, проверку научных гипотез, закономерностей - является важным элементом, входящим в основную обязательную программу подготовки. А учитывая прогнозируемые положительные эффекты, от персонализированного обучения, определяющей основой которого является личностно-профессиональное развитие, актуальность применения симуляционного контента становится неоспоримой.

Список литературы

1. Бабаева, Э. С. (2014). Сравнительный анализ формального и неформального образования. *Вестник ГУУ*, (6), 234–237. EDN: https://elibrary.ru/QRCKKS
2. Ваганова, О. И., Хохленкова, Л. А., Воронина, И. Р., & Гущин, А. В. (2020). Возможности симуляционных технологий в профессиональном образовании. *АНИ: педагогика и психология*, *3*(32), 56–60. https://doi.org/10.26140/anip-2020-0903-0010. EDN: https://elibrary.ru/BNDXMX
3. Громова, Г. Г. (2024). Симуляционное обучение глазами студентов. *Человеческий капитал*, *2*(182), 260–267. https://doi.org/10.25629/HC.2024.02.26. EDN: https://elibrary.ru/AOSYXY
4. Громыко, Н. В., & Половкова, М. В. (2009). *Метапредметный подход как ядро российского образования* [Электронный ресурс]. http://www.teacher-of-russia.ru/seminarlectures/2009/2009-seminar_lectures_gromyko_nv_polovkova_mv.pdf
5. Громыко, Н. В. (2000). *Мыследеятельностная педагогика*. Минск: Технопринт, 376 с.
6. Дубина, И. Н. (2006). *Математические основы эмпирических социально-экономических исследований*: учебное пособие. Барнаул: Изд-во Алт. ун-та, 263 с. ISBN: 5-7904-0553-3. EDN: https://elibrary.ru/QZJYSR

7. Дмитриева, М. Н., & Шмонова, М. А. (2019). Метапредметное содержание как фактор развития исследовательской компетентности студентов-медиков при изучении физико-математических дисциплин и информатики. *Учёные записки ОГУ. Серия: Гуманитарные и социальные науки*, (1), 234–237. EDN: https://elibrary.ru/JUZAJF
8. Козлов, Ю. А. (2024). Метавселенная — новая реальность в хирургии. Обзор литературы. *Российский вестник детской хирургии, анестезиологии и реаниматологии*, *14*(1), 69–81. https://doi.org/10.17816/psaic1774. EDN: https://elibrary.ru/OKQMFG
9. Крутий, И. А. (2019). *Симуляционное обучение в профессиональной подготовке врачей*: учебное пособие. М.: ФГБОУ ДПО РМАНПО Минздрава России, 79 с.
10. Квон, Г. М., & Вакс, В. Б. (2018). Использование шкалы Лайкерта при исследовании мотивационных факторов обучающихся. *Научно-методический электронный журнал «Концепт»*, (11), 1039–1051. https://doi.org/10.24411/2304-120X-2018-11086. EDN: https://elibrary.ru/YOMBRR
11. Князева, Е. Н. (2004). Концепция инактивированного познания: исторические предпосылки и перспективы развития. В: *Эволюция. Мышление. Сознание. (Когнитивный подход и эпистемология)* (сс. 308–349). М.: Канон +.
12. Князева, Е. Н. (2008). Сознание как синергетический инструмент. *Вестник МАН РС*, (2), 55–59. EDN: https://elibrary.ru/OMTFIB
13. Красильникова, В. А. (2006). *Информационные и коммуникационные технологии в образовании*. М.: ООО «Дом педагогики», 231 с. ISBN: 5-89382-108-4. EDN: https://elibrary.ru/QWPVRX
14. Ляудис, В. Я. (2003). *Методика преподавания психологии*. М.: Психология, 192 с. ISBN: 5-93692-049-6. EDN: https://elibrary.ru/QXFZPP
15. Мареев, О. В., Мареев, Г. О., Балкизов, З. З., Афонина, О. И., & Сыркин, Т. А. (2023). Применение виртуального хирургического симулятора для отработки навыков отохирургии в курсе оториноларингологии. *Виртуальные технологии в медицине*, *1*(2), 67–77. https://doi.org/10.46594/2687-0037_2023_2_1634. EDN: https://elibrary.ru/DEZBHJ
16. Меламуд, В. Э. (2004). *Информатизация образования как условие его модернизации*. М.: Московский психолого-социальный институт, 464 с.
17. Никулина, Т. В., & Стариченко, Е. Б. (2018). Информатизация и цифровизация образования: понятия, технологии, управление. *Педагогическое образование в России*, (8), 107–113. https://doi.org/10.26170/po18-08-15. EDN: https://elibrary.ru/XYCBET
18. Благотворительный фонд Сбербанка «Вклад в будущее». (2024). *Персонализированная модель образования с использованием цифровой*

платформы [Электронный ресурс]. https://vbudushee.ru/education/arkhiv-programm-i-proektov/programma-tsifrovaya-platforma-personalizirovannogo-obrazovaniya-dlya-shkoly/ (дата обращения: 22.09.2024)

19. Петровский, А. В., & Петровский, В. А. (1982). Индивид и его потребность быть личностью. *Вопросы философии*, (3), 44–53.
20. Роберт, И. В. (2007). *Теория и методика информатизации образования (психолого-педагогические и технологические аспекты)*. М.: ИИО РАО, 234 с.
21. Розина, И. Н. (2005). *Педагогическая компьютерно-опосредованная коммуникация: теория и практика*. М.: Логос, 456 с.
22. Савина, Н. В. (2020). Методологические основы персонализации образования. *Наука о человеке: гуманитарные исследования*, *14*(4), 82–90. https://doi.org/10.17238/issn1998-5320.2020.14.4.10
23. Стеценко, Н. В., & Коренева, В. В. (2013). Метапредметный подход в высших учебных заведениях. *Научно-методический журнал «Физическое воспитание и спортивная тренировка»*, *2*(6), 121–123. EDN: https://elibrary.ru/TENBOX
24. Тимощук, Н. А. (2015). Формирование метапредметной компетентности у студентов технического университета. *Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Психолого-педагогические науки*, (3), 233–241. EDN: https://elibrary.ru/VDMDEL
25. Хуторской, А. В. (2005). *Методика личностно-ориентированного обучения. Как обучить всех по-разному?*: пособие для учителя. М.: Владос-Пресс, 383 с.
26. Хуторской, А. В. (2013). Нынешние стандарты нужно менять, наполнять их метапредметным содержанием образования. *Народное образование*, (4), 157–171. EDN: https://elibrary.ru/OKQDRY
27. Хуторской, А. В. (2012). *Метапредметный подход в обучении*: научно-методическое пособие. М.: Издательство «Эйдос»; Издательство Института образования человека, 73 с.
28. Шутенко, Е. Н., Шутенко, А. И., & Ковтун, Ю. Ю. (2018). Признаки самореализации студентов как отражение их психологического благополучия в процессе обучения в вузе. *Психология. Историко-критические обзоры и современные исследования*, *7*(6А), 38–49. EDN: https://elibrary.ru/VXABCC
29. Швецова, В. А., & Пчелкина, Е. П. (2017). Синергетический подход к обучению студентов в системе высшего профессионального образования. *Историческая и социально-образовательная мысль*, *9*(3), 192–196. https://doi.org/10.17748/2075-9908-2017-9-3/1-192-196. EDN: https://elibrary.ru/YSSZWR

30. Bowen, W. G. (2013). *Higher education in the digital age*. Princeton University Press.
31. Chauvelot, J., Laurent, C., Le Coz, G., et al. (2020). Morphological validation of a novel bi-material 3D-printed model of temporal bone for middle ear surgery education. *Annals of Translational Medicine*, *8*(6), 304. https://doi.org/10.21037/atm.2020.03.14. EDN: https://elibrary.ru/KKSPFX
32. Zepeto. (2024). [Электронный ресурс]. https://web.zepeto.me/ru (дата обращения: 11.01.2024).

References

1. Babaeva, E. S. (2014). Comparative analysis of formal and non-formal education. *Bulletin of the State University of Management*, *(6)*, 234–237. EDN: https://elibrary.ru/QRCKKS
2. Vaganova, O. I., Khokhlenkova, L. A., Voronina, I. R., & Gushchin, A. V. (2020). Opportunities of simulation technologies in professional education. *ANIP: Pedagogy and Psychology*, *3*(32), 56–60. https://doi.org/10.26140/anip-2020-0903-0010. EDN: https://elibrary.ru/BNDXMX
3. Gromova, G. G. (2024). Simulation training through students' eyes. *Human Capital*, *2*(182), 260–267. https://doi.org/10.25629/HC.2024.02.26. EDN: https://elibrary.ru/AOSYXY
4. Gromyko, N. V., & Polovkova, M. V. (2009). *Metasubject approach as the core of Russian education*. Retrieved from: http://www.teacher-of-russia.ru/seminarlectures/2009/2009-seminar_lectures_gromyko_nv_polovkova_mv.pdf
5. Gromyko, N. V. (2000). *Thought-activity pedagogy*. Minsk: Tekhnoprint. 376 pp.
6. Dubina, I. N. (2006). *Mathematical foundations of empirical socio-economic research: textbook*. Barnaul: Altai State University Press. 263 pp. ISBN: 5-7904-0553-3. EDN: https://elibrary.ru/QZJYSR
7. Dmitrieva, M. N., & Shmonova, M. A. (2019). Metasubject content as a factor in developing research competence of medical students in studying physical-mathematical disciplines and informatics. *Scientific Notes of Oryol State University. Series: Humanities and Social Sciences*, *(1)*, 234–237. EDN: https://elibrary.ru/JUZAJF
8. Kozlov, Yu. A. (2024). Metaverse — a new reality in surgery: literature review. *Russian Bulletin of Pediatric Surgery, Anesthesiology and Resuscitation*, *14*(1), 69–81. https://doi.org/10.17816/psaic1774. EDN: https://elibrary.ru/OKQMFG
9. Krutiy, I. A. (2019). *Simulation training in professional medical education: textbook*. Moscow: FSBEI FPE RMACPE of the Ministry of Health of Russia. 79 pp.
10. Kvon, G. M., & Vaks, V. B. (2018). Using the Likert scale in studying motivational factors of learners. *Scientific and Methodological Electronic Journal*

"Koncept", *(11)*, 1039–1051. https://doi.org/10.24411/2304-120X-2018-11086. EDN: https://elibrary.ru/YOMBRR

11. Knyazeva, E. N. (2004). The concept of enactive cognition: historical background and development prospects. In: *Evolution. Thinking. Consciousness. (Cognitive approach and epistemology)* (pp. 308–349). Moscow: Kanon +.
12. Knyazeva, E. N. (2008). Consciousness as a synergetic tool. *Bulletin of MAN RS*, *(2)*, 55–59. EDN: https://elibrary.ru/OMTFIB
13. Krasilnikova, V. A. (2006). *Information and communication technologies in education*. Moscow: LLC "Dom Pedagogiki". 231 pp. ISBN: 5-89382-108-4. EDN: https://elibrary.ru/QWPVRX
14. Lyaudis, V. Ya. (2003). *Methods of teaching psychology*. Moscow: Psikhologiya. 192 pp. ISBN: 5-93692-049-6. EDN: https://elibrary.ru/QXFZPP
15. Mareev, O. V., Mareev, G. O., Balkizov, Z. Z., Afonina, O. I., & Syrkin, T. A. (2023). Using a virtual surgical simulator for practicing otosurgery skills in otorhinolaryngology course. *Virtual Technologies in Medicine*, *1*(2), 67–77. https://doi.org/10.46594/2687-0037_2023_2_1634. EDN: https://elibrary.ru/DEZBHJ
16. Melamud, V. E. (2004). *Informatization of education as a condition for its modernization*. Moscow: Moscow Psychological and Social Institute. 464 pp.
17. Nikulina, T. V., & Starichenko, E. B. (2018). Informatization and digitalization of education: concepts, technologies, management. *Pedagogical Education in Russia*, *(8)*, 107–113. https://doi.org/10.26170/po18-08-15. EDN: https://elibrary.ru/XYCBET
18. Sberbank Charitable Foundation "Investment in the Future". (2024). *Personalized education model using a digital platform*. Retrieved from: https://vbudushee.ru/education/arkhiv-programm-i-proektov/programma-tsifrovaya-platforma-personalizirovannogo-obrazovaniya-dlya-shkoly/ (accessed: 22.09.2024)
19. Petrovsky, A. V., & Petrovsky, V. A. (1982). Individual and his need to be a personality. *Questions of Philosophy*, *(3)*, 44–53.
20. Robert, I. V. (2007). *Theory and methodology of education informatization (psychological, pedagogical and technological aspects)*. Moscow: IIO RAO. 234 pp.
21. Rozina, I. N. (2005). *Pedagogical computer-mediated communication: theory and practice*. Moscow: Logos. 456 pp.
22. Savina, N. V. (2020). Methodological foundations of personalized education. *Science of Man: Humanitarian Studies*, *14*(4), 82–90. https://doi.org/10.17238/issn1998-5320.2020.14.4.10
23. Stetsenko, N. V., & Koreneva, V. V. (2013). Metasubject approach in higher education institutions. *Scientific and Methodological Journal "Physical Education and Sports Training"*, *2*(6), 121–123. EDN: https://elibrary.ru/TENBOX

24. Timoshchuk, N. A. (2015). Forming metasubject competence among technical university students. *Bulletin of Samara State Technical University. Series: Psychological and Pedagogical Sciences*, *(3)*, 233–241. EDN: https://elibrary.ru/VDMDEL
25. Khutorskoy, A. V. (2005). *Methodology of personality-oriented teaching. How to teach everyone differently?: teacher's guide*. Moscow: Vlados Press. 383 pp.
26. Khutorskoy, A. V. (2013). Current standards should be changed, filled with metasubject educational content. *Narodnoe Obrazovanie*, *(4)*, 157–171. EDN: https://elibrary.ru/OKQDRY
27. Khutorskoy, A. V. (2012). *Metasubject approach in teaching: scientific and methodological guide*. Moscow: Eidos Publishing House; Institute of Human Education Publishing House. 73 pp.
28. Shutenko, E. N., Shutenko, A. I., & Kovtun, Yu. Yu. (2018). Signs of student self-realization as a reflection of their psychological well-being in the process of university education. *Psychology. Historical-Critical Reviews and Current Research*, *7*(6A), 38–49. EDN: https://elibrary.ru/VXABCC
29. Shvetsova, V. A., & Pchelkina, E. P. (2017). Synergetic approach to teaching students in higher professional education. *Historical and Socio-Educational Thought*, *9*(3), 192–196. https://doi.org/10.17748/2075-9908-2017-9-3/1-192-196. EDN: https://elibrary.ru/YSSZWR
30. Bowen, W. G. (2013). *Higher education in the digital age*. Princeton University Press.
31. Chauvelot, J., Laurent, C., Le Coz, G., et al. (2020). Morphological validation of a novel bi-material 3D printed model of temporal bone for middle ear surgery education. *Annals of Translational Medicine*, *8*(6), 304. https://doi.org/10.21037/atm.2020.03.14. EDN: https://elibrary.ru/KKSPFX
32. Zepeto. (2024). [Electronic resource]. Retrieved from: https://web.zepeto.me/ru (accessed: 11.01.2024)

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Мизиев Исмаил Алимович, доктор медицинских наук, профессор, заведующий кафедрой факультетской и эндоскопической хирургии, директор Медицинской академии
Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова
ул. Чернышевского, 173, г. Нальчик, Кабардино-Балкарская Республика, 360004, Российская Федерация
medfak1@bk.ru

Ахохова Азис Владимировна, кандидат медицинских наук, доцент кафедры общественного здоровья, здравоохранения и профилактической медицины; заместитель главного врача
Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова; ООО Фирма «СЭМ»
ул. Чернышевского, 173, г. Нальчик, Кабардино-Балкарская Республика, 360004, Российская Федерация; ул. Головко, 7а, г. Нальчик, Кабардино-Балкарская Республика, 360017, Российская Федерация
Aza_stih@mail.ru

Карданова Лейла Дадашевна, доцент кафедры общей врачебной подготовки и медицинской реабилитации
Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова
ул. Чернышевского, 173, г. Нальчик, Кабардино-Балкарская Республика, 360004, Российская Федерация
leilakardanova@yandex.ru

Тлакадугова Мадина Хажисмеловна, заведующая кафедрой нормальной и патологической анатомии человека
Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова
ул. Чернышевского, 173, г. Нальчик, Кабардино-Балкарская Республика, 360004, Российская Федерация
tla-madina@yandex.ru

Тлупова Мадина Владимировна, к.м.н., ассистент кафедры инфекционных болезней Медицинской Академии
Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова
ул. Чернышевского, 173, г. Нальчик, Кабардино-Балкарская Республика, 360004, Российская Федерация
dikat.85@mail.ru

Бечелова Аминат Расуловна, заведующая кафедрой прикладной математики и информатики Медицинской Академии
Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова

ул. Чернышевского, 173, г. Нальчик, Кабардино-Балкарская Республика, 360004, Российская Федерация
bechelova1956@mail.ru

Тхабисимова Мария Муштафаровна, доцент кафедры прикладной математики и информатики Медицинской Академии
Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова
ул. Чернышевского, 173, г. Нальчик, Кабардино-Балкарская Республика, 360004, Российская Федерация
tembotova.mari@mail.ru

Медалиева Амина Аслановна, студентка
Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы
ул. Миклухо-Маклая, 6, г. Москва, 117198, Российская Федерация
amina.medalieva01@gmail.com

Тхабисимова Надира Мухамедовна, студентка Медицинской Академии
Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова
ул. Чернышевского, 173, г. Нальчик, Кабардино-Балкарская Республика, 360004, Российская Федерация
n.thabisimova@yandex.ru

DATA ABOUT THE AUTHORS

Ismail A. Miziev, Doctor of Medical Sciences, Professor, Head of the Department of Faculty and Endoscopic Surgery, Director of the Medical Academy
Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov
173, Chernyshevsky Str., Nalchik, Kabardino-Balkarian Republic, 360004, Russian Federation
medfak1@bk.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4920-0172
SPIN-code: 4701-4975

Azis V. Akhokhova, Candidate of Medical Sciences, Associate Professor of the Department of Public Health, Public Health and Preventive Medicine; Deputy Chief Physician

Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov; SEM Firm LLC
173, Chernyshevsky Str., Nalchik, Kabardino-Balkarian Republic, 360004, Russian Federation; 7a, Golovko Str., Nalchik, Kabardino-Balkarian Republic, 360017, Russian Federation
Aza_stih@mail.ru

Leila D. Kardanova, Associate Professor of the Department of General Medical Training and Medical Rehabilitation
Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov
173, Chernyshevsky Str., Nalchik, Kabardino-Balkarian Republic, 360004, Russian Federation
leilakardanova@yandex.ru

Madina Kh. Tlakadugova, Head of the Department of Normal and Pathological Human Anatomy
Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov
173, Chernyshevsky Str., Nalchik, Kabardino-Balkarian Republic, 360004, Russian Federation
tla-madina@yandex.ru

Madina V. Tlupova, Candidate of Medical Sciences, Assistant of the Department of Infectious Diseases of the Medical Academy
Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov
173, Chernyshevsky Str., Nalchik, Kabardino-Balkarian Republic, 360004, Russian Federation
dikat.85@mail.ru
ORCID: https://orcid.org/0009-0000-4504-8364

Aminat R. Bechelova, Head of the Department of Applied Mathematics and Informatics of the Medical Academy
Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov
173, Chernyshevsky Str., Nalchik, Kabardino-Balkarian Republic, 360004, Russian Federation
bechelova1956@mail.ru

Maria M. Tkhabisimova, Associate Professor of the Department of Applied Mathematics and Informatics of the Medical Academy

Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov
173, Chernyshevsky Str., Nalchik, Kabardino-Balkarian Republic, 360004, Russian Federation
tembotova.mari@mail.ru
ORCID: https://orcid.org/0009-0004-7687-246X

Amina A. Medalieva, student
Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba
6, Miklukho-Maklaya Str., Moscow, 117198, Russian Federation
amina.medalieva01@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0009-0005-4116-7071

Nadira M. Tkhabisimova, student of the Medical Academy
Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov
173, Chernyshevsky Str., Nalchik, Kabardino-Balkarian Republic, 360004, Russian Federation
n.thabisimova@yandex.ru
ORCID: https://orcid.org/0009-0004-8687-2383

Поступила 07.11.2024 Received 07.11.2024
После рецензирования 10.01.2025 Revised 10.01.2025
Принята 23.01.2025 Accepted 23.01.2025

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-4-1493 **EDN: IGOTOJ**
УДК 616.12-005.4-08

CC BY NC ND

Научная статья

ВЛИЯНИЕ МЕДИКАМЕНТОЗНОЙ ТЕРАПИИ И ПРИВЕРЖЕННОСТИ К НЕЙ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ АНТИАГРЕГАНТНОЙ ТЕРАПИИ У ПАЦИЕНТОВ ХРОНИЧЕСКОЙ ИШЕМИЧЕСКОЙ БОЛЕЗНЬЮ СЕРДЦА

О.В. Демьяненко, В.И. Вишневский, И.А. Снимщикова, М.О. Ревякина

Аннотация

Обоснование. Резистентность к антиагрегантной терапии увеличивает вероятность сердечно-сосудистых осложнений и коронарной смерти. Преодоление резистентности к ацетилсалициловой кислоте способствует снижению риска развития кардиоваскулярных событий в будущем.

Цель. Оценить эффективность кишечнорастворимой формы ацетилсалициловой кислоты у пациентов с хронической ишемической болезнью сердца, рассмотреть пути преодоления резистентности к ней.

Материал и методы. С целью оценки инициального уровня агрегационной активности тромбоцитов было обследовано 74 пациента, 54 составили основную группу пациентов с хронической ИБС и 20 пациентов группу контроля.

Результаты. Исходно уровень агрегационной активности тромбоцитов между группами достоверно различался. Различия сохранялись и после применения Тромбо АСС 100 мг/сут, что позволило предположить низкую эффективность антиагрегантной терапии у части пациентов. Сочетанное применение ацетилсалициловой кислоты и липидснижающей терапии наряду с высокой мотивированностью пациентов к медикаментозному лечению, приводило к дополнительному снижению агрегационной активности тромбоцитов и снижению резистентности к ней.

Заключение. Результаты исследования указывают, что у пациентов с хронической ИБС значительно повышена агрегационная активность тромбоцитов. Применение липидснижающей терапии и высокая приверженность к

медикаментозному лечению достоверно увеличивает эффективность антиагрегантной терапии.

Ключевые слова: хроническая ишемическая болезнь сердца; ацетилсалициловая кислота; резистентность; статины; приверженность к терапии

Для цитирования. Демьяненко, О. В., Вишневский, В. И., Снимщикова, И. А., & Ревякина, М. О. (2025). Влияние медикаментозной терапии и приверженности к ней на эффективность антиагрегантной терапии у пациентов с хронической ишемической болезнью сердца. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(4), 447-467. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-4-1493

Original article

INFLUENCE OF DRUG THERAPY AND ADHERENCE TO IT ON THE EFFECTIVENESS OF ANTIPLATELET THERAPY IN PATIENTS WITH CHRONIC ISCHEMIC HEART DISEASE

O.V. Demyanenko, V.I. Vishnevsky, I.A. Snimshchikova, M.O. Revyakina

Abstract

Background. Resistance to antiplatelet therapy increases the likelihood of cardiovascular complications and coronary death. Overcoming resistance to acetylsalicylic acid helps reduce the risk of developing cardiovascular events in the future.

Purpose. To evaluate the effectiveness of the enteric-coated form of acetylsalicylic acid in patients with chronic ischemic heart disease and to consider ways to overcome resistance to it.

Materials and methods. In order to assess the initial level of platelet aggregation activity, 74 patients were examined, 54 of whom formed the main group of patients with chronic coronary heart disease and 20 patients formed the control group.

Results. Initially, the level of platelet aggregation activity between the groups differed significantly. The differences persisted after the use of Thrombo ASS 100 mg/day, which suggested low efficiency of antiplatelet therapy in some patients. Combined use of acetylsalicylic acid and lipid-lowering therapy, along with high motivation of patients for drug treatment, led to an additional decrease in platelet aggregation activity and a decrease in resistance to it.

Conclusion. The results of the study indicate that patients with chronic coronary heart disease have significantly increased platelet aggregation activity. The use of lipid-lowering therapy and high adherence to drug treatment significantly increases the effectiveness of antiplatelet therapy.

Keywords: chronic ischemic heart diseases; acetylsalicylic acid; resistance; statins; adherence to therapy

For citation. Demyanenko, O. V., Vishnevsky, V. I., Snimshchikova, I. A., & Revyakina, M. O. (2025). Influence of drug therapy and adherence to it on the effectiveness of antiplatelet therapy in patients with chronic ischemic heart disease. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(4), 447-467. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-4-1493

Введение

Мировая практика показывает, что к заболеваниям, значимо приводящим к утрате трудоспособности населения и летальным исходам, следует отнести заболевания сердечно-сосудистой системы. Согласно данным Всемирной организации здравоохранения в 2019 году летальность от сердечно-сосудистых заболеваний (ССЗ) составила 32% всех случаев смерти в мире, из которых на ишемическую болезнь сердца (ИБС) и инсульт пришлось до 85% [18].

В Российской Федерации в структуре смертности ведущую позицию так же занимают ССЗ. По данным Росстата РФ в 2022 году в 43,8% случаев по отношению ко всем умершим причиной летальных исходов были ССЗ, из них ИБС составила 23,8%. Следует отметить ежегодный рост числа ССЗ, в том числе ИБС [4].

Лечение ССЗ направлено на улучшение отдаленного прогноза, в первую очередь за счет применения антитромбоцитарных препаратов, β-адреноблокаторов и гиполипидемических средств. Опыт назначения антиагрегантной терапии (ААТ) у больных ИБС позволяет утверждать, что антиагреганты однозначно нужны при лечении ИБС [15], но необходимо уметь прогнозировать эффективность их действия. Вариантов может быть два - чрезмерная антиагрегантная активность, и противоположная первой - недостаточная активность. В медицинской литературе последний феномен получил название «резистентность к ацетилсалициловой кислоте» (АСК). Последнюю принято рассматривать как невозможность АСК подавлять в адекватной мере продукцию тромбоксана A_2 (TxA_2) и, тем самым, снижать частоту развития тромботических осложнений. В XXI веке резистентность к АСК является важной проблемой практической кардиологии [17; 19; 21], поскольку 3-х кратно увеличивается риск сердечно-сосудистых осложнений [11]. Рас-

пространенность этого явления колеблется в довольно широких пределах – 5 – 60% [3, 22], что обусловлено различием в дизайне цитируемых исследований, начиная с групп пациентов, дозовых режимов и формы АСК, заканчивая методами оценки функции тромбоцитов.

Следует рассмотреть целый ряд причин устойчивости к АСК [5; 25]:

1) неадекватные дозы АСК;

2) пониженное биоаккумулирование АСК;

2) активация альтернативных путей агрегации тромбоцитов (Тц);

3) состояния, сопровождающиеся избыточным образование Тц и лейкоцитов [3; 5];

4) генетические факторы – полиморфизм гликопротеиновых рецепторов Ia/IIa, Ib/V/IX, IIb/IIIa, рецепторов к коллагену и фактору Виллебранда, полиморфизм циклооксигеназы-1 (ЦОГ-1) и 2, $ТхА_2$-синтазы и др. [22];

5) курение;

6) дислипидемия;

7) взаимодействие тромбоцитов с другими ингибиторами активной зоны фермента ЦОГ-1;

8) низкая приверженность лечению.

Одним из наиболее удобных способов оценки приверженности к терапии является применение различных опросников [7], которые относятся к косвенным методам оценки и, как правило, достаточно субъективны, также для повышения точности требуется одновременное использование двух и более опросников, что затруднительно в реальной клинической практике. К тому же опросники оценивают общую поведенческую реакцию по отношению к фармакотерапии, отвечая на вопросы опросника или врача пациенты могут завышать приверженность к терапии, что приводит к ошибочной интерпретации данных о состоянии пациента или лабораторных показателей и приводить к неверным клиническим решениям. Также следует отметить, что несмотря на минусы, применение опросников, заполненных самостоятельно пациентами, в сочетании с ведущей ролью лечащего врача способствует повышению приверженности к лечению [8].

Врачу, назначающему больному ААТ, также необходимо убедиться не только в отсутствии потенциальных источников кровотечения, но и в эффективности данной терапии.

Для оценки агрегации тромбоцитов (АТ) предложены ряд методик, которые используются в настоящее время [5]:

1) оптическая (световая) агрегатометрия. Это классический метод исследования АТ, предложенный G.V. Born и N. O'Brien еще в 1962 году

[16]. Она применяется в довольно широком диапазоне – от диагностики патологии тромбоцитов до оценки результатов лечения дезагрегантами и риска кровотечения. Данный метод позволяет использовать различные агонисты, оценить динамику процесса. Достоинством его является наличие шкалы результатов АТ.

2) турбидиметрический метод (VerifyNow system). Применялся в ряде крупных клинических исследований. Не является трудоемким в аспекте выполнения и интерпретации полученных данных. Достоинством его, как и предыдущего, является наличие количественной шкалы результатов АТ, а также возможность раздельно анализировать активность рецепторов к $ТхА_2$ и пуриновых рецепторов (P_2Y_{12}), может быть использован как прикроватный тест.

3) метод импедансной агрегатометрии (Multiplate ADP test). Имеет количественную шкалу результатов АТ. Может использоваться для оценки результатов лечения и риска кровотечений, а также как прикроватный тест.

Именно эти методики получили широкое распространение для оценки АТ поскольку позволяют количественно оценить ее результаты, провести исследование АТ у постели больного с быстрым получением результата.

В последние годы в литературе рассматривают термин «высокая остаточная реактивность тромбоцитов» (ВОРТ), который указывает на повышенную агрегационную активность тромбоцитов. Некоторые авторы предлагают рассматривать ВОРТ как модифицируемый фактор риска развития ИБС и необходимость учитывать его как неблагоприятный признак в плане прогноза [5].

При хронических формах ИБС показана ААТ, которая направлена, в первую очередь, на улучшение прогноза у этой категории больных. Среди ААТ препаратом выбора является ацетилсалициловая кислота. Согласно Российским национальным рекомендациям, пациентам со стабильной ИБС в качестве ингибитора агрегации тромбоцитов рекомендуется назначение АСК в дозе 75–100 мг/сут [2].

Цель настоящего исследования – оценить влияние кишечнорастворимой формы АСК на агрегационную способность тромбоцитов у пациентов с хронической ИБС и рассмотреть возможности преодоления резистентности к ней.

Материалы и методы

Под наблюдением находилось 74 пациента в возрасте 40-65 лет обоего пола, из которых 54 составили основную и 20 контрольную группы. Обследование проводилось с соблюдением норм и правил биомедицинской

этики, утвержденных Хельсинской декларацией Всемирной медицинской ассоциации об этических принципах проведения медицинских исследований (2013). На проведение исследования получено разрешение этического комитета медицинского института Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева (протокол № 28 от 19 декабря 2023 г).

Все пациенты дали письменное информированное согласие на участие в исследовании.

Критериями включения в основную группу явились: ИБС: стабильная стенокардия напряжения II-III функционального класса (ФК), перенесенный инфаркт миокарда (ИМ) без коронарного вмешательства в анамнезе.

Критерии исключения: нарушения сердечного ритма и проводимости, артериальная гипертония выше I степени, сахарный диабет, гематологические и онкологические заболевания, язвенная болезнь желудка и 12-перстной кишки, ожирение более I степени и другие заболевания, способные повлиять на результаты обследования. Кроме того, на момент включения в исследование пациенты по тем или иным причинам не принимали ААТ и гиполипидемическую терапию или приверженность к ним была низкая.

Приверженность пациентов к медикаментозной терапии до включения в исследование, через 1 и 3 месяца наблюдения оценивалась с помощью модифицированного опросника Мориски-Грина MMAS-4 (4-вопросная шкала) [6] и прямого опроса.

Контрольную группу составили лица, не страдающие хроническими формами ИБС, которые до и вовремя исследования не получали ААТ, сопоставимые по полу и возрасту с основной группой.

Характеристика пациентов основной и контрольной групп, представлена в таблице 1.

Таблица 1.

Общая характеристика пациентов

Параметры	Основная группа n=54	Контрольная группа n=20	Значение p
Возраст, годы (M ±SD)	53,25±4,65 лет	50,56±5,35	0,96
Женщины, n (%)	16 (29,6)	6 (30)	0,49
Мужчины, n (%)	38 (70,4)	14 (70)	0,97
Стенокардия ФК II, n (%)	34 (62,9)	-	
Стенокардия ФК III, n (%)	20 (37,1)	-	
Перенесенный инфаркт миокарда, n (%)	12 (22,2)	-	
АГ (не выше 1 степени), n (%)	31 (57,4)	-	

ИМТ>25 кг/м^2, n (%)	35 (64,8)	7 (35)	<0,05
Курение/курили, n (%)	21 (38,9)	4 (20)	<0,05
ГЛЖ (по данным ЭхоКГ), n (%)	25 (46,2)	-	
ФВ, % (M ±SD)	52.98±1.27	59,36±2,25	<0,05

Примечание: n – число больных, ФК – функциональный класс, АГ – артериальная гипертония, ИМТ – индекс массы тела, ГЛЖ – гипертрофия левого желудочка, ФВ – фракция выброса.

Пациенты основной группы получали базовое медикаментозное лечение β-адреноблокаторами (бисопролол в средней дозе 7,5 мг/сутки), ингибиторы АПФ (периндоприл в средней дозе 5 мг/сутки), статины (аторвастатин в дозе 40 мг/сутки), при необходимости пролонгированные нитраты (при III ФК стенокардии). Наличие гипертонической болезни 1 степени на момент исследования не требовало дополнительного назначения гипотензивных препаратов.

Приверженность к медикаментозному лечению, в том числе препаратами АСК и статинами, в течение всего периода наблюдения определялась на основании прямого опроса во время визитов и применении модифицированного опросника MMAS-4, где каждый положительный ответ оценивался 1 баллом, результат 0 баллов – высокая (полная) приверженность к лечению; 1 балл – средняя (частичная); 2 и более баллов – низкая приверженность (неприверженность).

Вначале всем пациентам было проведено общеклиническое, лабораторное (общий анализ крови, включая тромбоциты, липидный спектр, АСТ, АЛТ, креатинин плазмы крови, исследование АТ) и инструментальное исследование (велоэргометрическая проба с программным обеспечением фирмы «НейроСофт», эхокардиография на ультразвуковом сканере «ACUSON» – США).

Оценку агрегации тромбоцитов проводили турбодиметрическим методом по Борну на анализаторе АР 2110 (фирма «SOLAR»). Оценивали коэффициент светопропускания в термостатируемой, перемешиваемой и стандартизированной по количеству Тц (200-250x10^9/л) суспензии клеток. Растворы аденозиндифосфата (АДФ) (НПО «Ренам») использовались как индукторы агрегации. Проводили анализ степени максимальной АТ в процентах (A_{max}), начальной скорости (V_A) и времени агрегации (tA).

В нашем исследовании воздействие на Тц группы контроля дозы АДФ 2,5 мкМ вызывало появление первичной обратимой волны АТ, доза АДФ 5 мкМ – провоцировала появление вторичной необратимой волны агрегации, двухфазная АТ, за счет реакции высвобождения собственных

агонистов, содержащихся в Тц (АСК при сеситивности к ААТ должна редуцировать эту волну), при этом A_{max} была ниже 60%, а доза АДФ 10 мкМ – приводила к необратимой агрегации в виде слияния двух волн в одну.

Инициальную эффективность ААТ основной группы оценивали по A_{max} в процентах при конечной концентрации АДФ 5 мкМ, при этой концентрации практически у всех пациентов основной группы также наблюдалась вторичная волна агрегации. Показателем хорошего эффекта или сенситивности к АСК считали снижении A_{max} ниже 60% и появлении первичной обратимой АТ; недостаточного эффекта или недостаточной сенситивности - сохранение A_{max} более 60%, но ниже, выявленной до назначения ААТ; отсутствие эффекта или резистентность – сохранение вторичной волны агрегации.

Учитывая тот факт, что пациенты основной группы в подавляющем большинстве не получали регулярно ААТ и гиполипидемическую терапию, что было связано с низкой информированностью о заболевании, причинах его возникновения и дальнейшего течения, а также боязнью побочных эффектов, была проведена дополнительная беседа о необходимости регулярного применения препаратов АСК и статинов.

Статистическую обработку данных проводили с использованием методов однофакторного дисперсного и корреляционного анализа и пакетов прикладных программ Statistica 10.0, версия для Windows и Microsoft Office Excel. Вычисляли средние величины количественных показателей, стандартные ошибки и критерий согласия Пирсона (χ^2). Полученные данные представлены в виде M±SD. Для оценки достоверности различий между группами применялся критерий Стьюдента (использовались парный критерий Стьюдента или критерий Вилкоксона) и дисперсионный анализ. Различия считали статистически значимыми при $p<0,05$.

Результаты исследования и обсуждение

Анализ данных обследования в основной группе пациентов, не получающих ААТ, выявил достоверное превышение показателей АТ по сравнению с аналогичными показателями контрольной группы ($p<0,05$ - $p<0,001$) (таблица 2).

У пациентов основной группы через один месяц приема АСК 100 мг/сут отмечено снижение A_{max} ($p<0,05$) и tA по сравнению с исходными данными ($p<0,05$-$p<0,001$), но сохранялись достоверно более высокие значения A_{max} ($p<0,01$) и V_A ($p<0,001$) при сравнении с группой контроля, что позволяет предположить, что данные результаты связаны с ВОРТ у части пациентов. При рассмотрении графического изображения АТ паци-

ентов, принимавших Тромбо АСС 100 мг/сут, у 20,3% (n=11) пациентов отмечалось сохранение вторичной волны агрегации или недостаточное ее редуцирование, что свидетельствует о сохраняющейся повышенной активности тромбоцитов и необратимым их связыванием с фибрином. У 24,1% (n=13) пациентов при отсутствии вторичной волны A_{max} превышала 60%, что также свидетельствовало о недостаточной эффективности проводимой ААТ.

Таблица 2.

Агрегационная активность тромбоцитов на фоне терапии Тромбо АСС 100 и группы контроля (M ±SD)

Параметры		Контроль, ИБС-	Основная группа, ИБС+		Значение p		
		Без ААТ	Исходно	1мес.терапиии	1-2	2-3	1-3
		1 (n = 20)	2 (n = 54)	3 (n = 54)			
5,0 мкМ АДФ	A_{max}, %	46,08±3,35	72,51±2,18	56,41±2,37	p<0,001	p<0,05	p<0,01
	tA, мин: сек	2:58±0:11	4:07±0:16	2:52±0:12	p<0,01	p<0,001	нд
	V_A, (30с)%/мин	42,55±2,19	56,61±2,75	57,31±3,06	p<0,001	нд	p<0,001

Примечание: p_{1-2} - достоверность различий показателей между контрольной группой и основной группой исходно; p_{2-3} - достоверность различий показателей между основной группой исходно и основной группой через 1 месяц терапии; p_{1-3} - достоверность различий показателей между контрольной группой и основной группой через 1 месяц терапии. Amax – максимальное значение степени агрегации; tA – время агрегации; $V_{A\_}$ скорость агрегации.

Анализ распределения пациентов по эффективности ААТ с учетом наших показателей (редуцирование вторичной волны АТ и A_{max} ниже 60%) на фоне терапии Тромбо АСС 100 мг/сут показал, что сенситивность к ААТ отмечалась у 55,6% (n=30), недостаточная сенситивность у 24,1% (n=13) и резистентность наблюдалась у 20,3% (n=11) пациентов. Разделение на две подгруппы «сенситивных» и «недостаточно сенситивных - резистентных» выявило достоверно более низкие показатели АТ у «сенситивных», как исходно, так и на фоне приема Тромбо АСС 100 мг/сут (таблица 3).

У пациентов «сенситивных» к ААТ показатели агрегации через 1 месяц терапии достоверно снижались (p<0,01), при этом A_{max} достигала уровня группы контроля. В группе пациентов «недостаточно сенситивных - резистентных» к Тромбо АСС 100 мг/сут также отмечено достоверное снижение агрегации Тц, но A_{max} значительно превышала показатель группы контроля, что, по-видимому, связано с сохранением у части пациентов

ВОРТ. Между группами «сенситивных» и «недостаточно сенситивных - резистентных» к ААТ были получены статистически значимые различия A_{max} и tA ($p<0,05$, $p<0,01$). Таким образом, результаты показывают обоснованность разделения на две подгруппы «сенситивных» и «недостаточно сенситивных - резистентных» пациентов.

Таблица 3.

Сравнение агрегационной активности тромбоцитов у сенситивных и недостаточно сенситивных-резистентных к Тромбо АСС 100 пациентов и группы контроля (M ±SD)

Параметры		Пациенты сенситивные к ААТ (n = 30)		Пациенты нед. сенситив. – резистентные к ААТ (n = 24)		Контроль (n = 20)	Значение p		
		1 Исходно	2 1мес терапии	3 Исходно	4 1мес терапии	ИБС-	1-2	3-4	Δ1-2-Δ3-4
5,0 мкМ АДФ	A_{max}, %	63,98±4,13	43,25±3,15	75,98±2,39	58,39±2,67	46,08±3,35	**	**	*
	tA, мин: сек	4:39±0:24	1:43±0:18	4:13±0:16	2:41±0:12	2:58±0:11	**	*	**

Примечание: * - достоверность различий показателей $p<0,05$; ** - $p<0,01$.

p_{1-2} - достоверность различий показателей в группе сенситивных к АСК исходно и через месяц терапии; p_{3-4} - достоверность различий показателей в группе нед. сенситивных – резистентных к АСК исходно и через 1 месяц терапии; $p_{\Delta 1-2-\Delta 3-4}$ - достоверность различий показателей между группами сенситивных и нед. сенситивных – резистентных пациентов.

A_{max} – максимальное значение степени агрегации; tA – время агрегации.

В работе Н.С. Фроловой и соавт. [11] было показано, что биохимическая резистентность к АСК не поддается коррекции с помощью увеличения дозы, а переход на более эффективный антитромбоцитарный препарат или его сочетанное применение с АСК может в значительной степени потенцировать как антиагрегантный, так и противовоспалительный эффекты [10; 12], но и значительно увеличить вероятность малых и крупных кровотечений особенно при длительном приеме у пациентов при хронической стабильной ИБС, поэтому возможно пойти по пути не прямого снижения ВОРТ, а опосредованного за счет снижения воспаления и эндотелиальной дисфункции [13].

Статины, помимо основного гиполипидемического действия, обладают способностью снижать хроническое воспаление в измененных атеросклерозом сосудах и восстанавливают функцию эндотелия [14]. Комбинация АСК со статинами должна иметь системный синергический эффект – антитромбоцитарный и противовоспалительный. Согласно последним Рос-

сийским рекомендациям по ведению больных стабильной ишемической болезнью сердца, пациенты основной группы с первого дня включения в исследование принимали аторвастатин в дозе 40 мг/сутки [2].

Следует отметить, что изменение АТ при сенситивности к АСК наблюдается в среднем через два часа, с момента поступления препарата в кровоток, и не меняется до момента гибели Тц из-за необратимого ингибирования ЦОГ-1. Максимальное гиполипидемическое действие статинов и особенно плейотропные эффекты развиваются постепенно спустя недели и даже месяцы лечения, что подтверждают результаты нашего исследования. После 1 и 3-х месячного курса терапии аторвастатином (Ато) в сочетании с ААТ изменение агрегационных параметров в подгруппе «сенситивных» пациентов достоверно не наблюдалось, хотя имелась тенденция к снижению средней A_{max}, в подгруппе же недостаточно сенситивных и резистентных к Тромбо АСС 100 мг/сут пациентов отмечена достоверная положительная динамика показателей АТ (таблица 4).

Таблица 4.

Агрегационная активность тромбоцитов на фоне приема Тромбо АСС 100 и аторвастатина у сенситивных и недостаточно сенситивных-резистентных пациентов (M ±SD)

Параметры		Пациенты				Контроль (n = 20)	Значение p		
		Сенситивные к ААТ (n = 30)		Нед. сенситивные – резистентные к ААТ (n = 24)					
		1 Тр АСС 100+Ато (1мес)	2 Тр АСС 100+Ато (3мес)	3 Тр АСС 100+Ато (1мес)	4 Тр АСС 100+Ато (3мес)	5 ИБС-	1-2	3-4	4-5
5,0 мкМ АДФ	A_{max}, %	43,25±3,15	41,55±2,76	58,39±2,67	50,25±2,37	46,08±3,35	нд	*	нд
	tA, мин: сек	1:43±0:18	2:05±0:11	2:41±0:12	2:53±0:11	2:58±0:11	нд	нд	нд

Примечание: * - достоверность различий показателей p<0,05.

p_{1-2} - достоверность различий показателей в группе сенситивных через 1 и 3 месяца терапии; p_{3-4} - достоверность различий в группе нед. сенситивных – резистентных через 1 и 3 месяца терапии; p_{4-5} - достоверность различий показателей между группой нед. сенситивных – резистентных через 3 месяца терапии и контрольной группой. Amax – максимальное значение степени агрегации; tA – время агрегации.

Через 3 месяца сочетанной терапии Тромбо АСС 100 мг/сут с Ато 40 мг/сут в подгруппе недостаточно сенситивных и резистентных достоверно снизилась ВОРТ (p<0,05). При анализе показателей эффективности ААТ

сенситивность отмечалась у 81,5% (n=44), недостаточная сенситивность и резистентность наблюдалась у 13% (n=7) и 5,5% (n=3) соответственно. Таким образом, через 1 месяц сочетанного применения АСК и статина сенситивность к ААТ по нашим критериям отмечена у 55,6%, а через 3 месяца она увеличилась до 81,5%, а абсолютная резистентность с 20,3% снизилась до 5,5%; достижение такого результата связано с высокой приверженностью пациентов к терапии.

Приверженность к медикаментозной терапии оценивалась с помощью прямого опроса и опросника MMAS-4 динамика показателей представлена в таблице 5.

Таблица 5.

Приверженность к ААТ и терапии статином (тест MMAS-4)

Уровень приверженности к терапии	1 Исходно n = 54 (%)	2 1 месяц терапии n = 54 (%)	3 3 месяца терапии n = 54 (%)	p	
				1-2	1-3
Высокая	0 (0)	50 (92,6)	51 (94,4)	p<0,001	p<0,001
Средняя	0 (0)	4 (7,4)	3 (5,6)		
Низкая	54 (100)	0 (0)	0 (0)		

Примечание: p_{1-2} - достоверность различий показателей между основной группой исходно и основной группой через 1 месяц терапии; p_{1-3} - достоверность различий показателей между основной группой исходно и основной группой через 3 месяца терапии.

По данным опросника пациенты основной группы через 1 месяц и 3 месяца наблюдения показывают высокую приверженность к медикаментозной терапии, что подтверждалось результатами прямого опроса. Согласно данным врачебного опроса во время визитов основная причина снижения приверженности к фармакотерапии являлся пропуск приема препарата особенно в вечернее время.

Нами проведен корреляционный анализ, выявлены связи средней силы между степенью снижения ХС ЛПНП и эффективностью ААТ (r=0,472, p<0,05). Таким образом, назначение статина позволяет не только снижать уровень холестерина, но и увеличивать эффективность ААТ, снижая ВОРТ. Следует отметить, что 57,1% (n=4) «недостаточно сенситивных» и 100% (n=3) «резистентных» пациентов через 3 месяца применения Ато в дозе 40 мг/сут не смотря на высокую приверженность к терапии не достигли оптимальных значений ХС ЛПНП ниже 1,4 ммоль/л.

Имеются сообщения, где резистентность к АСК ассоциировалась с повышенной массой тела, с женским полом, с увеличением возраста [20; 24]. В нашем исследовании корреляционный анализ выявил связи средней силы между некоторыми параметрами пациентов. Так, эффективность Тромбо АСС 100 мг/сут была достоверно ниже у пациентов старше 55 лет ($r=0,479$, $p<0,01$) и при увеличении ИМТ более 25 кг/м^2 (коэффициент Пирсона $r=-0,326$, $p<0,05$), поэтому снижение веса может быть хорошей рекомендацией для повышения эффективности к ААТ у таких пациентов.

Таким образом, полученные результаты исследования дают основание полагать, что введенные нами показатели эффективности ААТ способствуют выявлению пациентов с ВОРТ на фоне приема АСК. С помощью оценки эффективности ААТ выявлена сенситивность только у 55,6% на фоне сочетанного приема в течение 1 месяца кишечнорастворимой формы Тромбо АСС 100 мг/сут и статина.

Аторвастатин в дозе 40 мг/сут позволил оптимизировать ААТ, по-видимому, за счет снижения воспалительного компонента и эндотелиальной дисфункции, и достоверно увеличить сенситивность к ААТ до 81,5% через 3 месяца сочетанного приема. Следует отметить, что пациенты резистентные к ААТ не достигли оптимальных значений липидов, что позволяет предполагать, что интенсификация гиполипидемической терапии приведет дополнительно к увеличению сенситивности к ААТ в отдаленном периоде.

Важным фактором, определяющим успешность медицинской помощи, является приверженность к назначенной терапии, которая особенно страдает у пациентов хронической ИБС [1]. В нашем исследовании пациенты высоко оценивали собственный уровень соблюдения врачебных рекомендаций: более 90% утверждали, что принимают назначенные препараты в 100% случаев, высокий уровень приверженности к фармакотерапии подтверждали и данные опросника. Эти значения приблизились к среднеевропейским показателям и чуть лучше полученных в исследованиях EUROASPIRE V [9], что, по-видимому, связано с непродолжительным периодом наблюдения. Результаты нашего исследования подтверждают повышение приверженности пациентов к медикаментозной терапии при регулярном наблюдении врачом, прошедших образовательную беседу, объясняющую в доступной форме необходимость регулярного применения антиагрегантной и гиполипидемической терапии, в том числе информацию о возможных побочных эффектах и что польза от их применения многократно превосходит этот теоретический риск.

Заключение

Несмотря на немалое число противников использования лабораторной оценки эффективности антиагрегантной терапии у пациентов со стабильной ИБС, ВОРТ является весомым фактором риска повышения неблагоприятных сердечно-сосудистых событий, что обосновывает необходимость использовать тесты, оценивающие активность тромбоцитов у пациентов с высоким риском тромботических осложнений.

В случае сохранения ВОРТ на фоне оптимальной антиагрегантной и гиполипидемической терапии целесообразно применение препаратов с другим механизмом действия или двойной антитромбоцитарной терапии.

Ведущее значение для повышения приверженности к лечению, а значит и увеличения эффективности проводимой терапии имеет работа лечащего врача с пациентом, но и сам врач не должен быть инертным и всеми доступными для него способами стремиться к выполнению клинических рекомендаций.

Заключение комитета по этике. Исследование было проведено в соответствии с принципами положения Хельсинкской декларации Всемирной медицинской ассоциации (Declaration of Helsinki, and approved by the Institutional Review Board). На проведение исследования получено разрешение этического комитета медицинского института Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева (протокол № 28 от 19 декабря 2023 г).

Информированное согласие. Информированное согласие было получено от всех субъектов, участвовавших в исследовании.

Информация о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация о спонсорстве. Работа выполнена в ОГУ имени И.С. Тургенева в рамках государственного задания № 075-00195-25-00 на 2025 год и на плановый период 2026 и 2027 годов, проект FSGN-2024-0014 (1024041900023-6-3.1.3;3.2.12;3.2.4).

Список литературы

1. Агеев, Ф. Т., Смирнова, М. Д., & Фофанова, Т. В. (2023). Низкая приверженность терапии и пути её преодоления на примере антиагрегантной терапии. *РМЖ. Медицинское обозрение*, *7*(1), 56–61. https://doi.org/10.32364/2587-6821-2023-7-1-56-61. EDN: https://elibrary.ru/MWYDWS
2. Барбараш, О. Л., Карпов, Ю. А., Панов, А. В., и др. (2024). Стабильная ишемическая болезнь сердца. Клинические рекомендации 2024. *Российский*

кардиологический журнал, *29*(9), 167–229. https://doi.org/10.15829/1560-4071-2024-6110. EDN: https://elibrary.ru/HHJJUT

3. Бурячковская, Л. И., Ломакин, Н. В., Русанова, А. В., и др. (2016). Резистентность к ацетилсалициловой кислоте: причины и следствие. *Сердце: журнал для практикующих врачей*, *15*(5), 379–388. https://doi.org/10.18087/RHJ.2016.5.2261. EDN: https://elibrary.ru/WVNEPT
4. Росстат. (2023). *Здравоохранение в России*: статистический сборник. М.: Росстат, 179 с. https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Zdravoohran-2023.pdf
5. Ломакин, Н. В., Сумароков, А. Б., Доценко, Ю. В., и др. (2017). Индивидуальный подход к применению антитромбоцитарной терапии. На что опереться в решении? *Атеротромбоз*, (2), 70–78. https://doi.org/10.21518/2307-1109-2017-2-70-78. EDN: https://elibrary.ru/XHLJGF
6. Лукина, Ю. В., Марцевич, С. Ю., & Кутишенко, Н. П. (2016). Шкала Мориски-Грина: плюсы и минусы универсального теста, работа над ошибками. *Рациональная фармакотерапия в кардиологии*, *12*(1), 63–65. https://doi.org/10.20996/1819-6446-2016-12-1-63-65. EDN: https://elibrary.ru/VRCVIZ
7. Лукина, Ю. В., Кутишенко, Н. П., Марцевич, С. Ю., и др. (2020). Опросники и шкалы для оценки приверженности к лечению — преимущества и недостатки диагностического метода в научных исследованиях и реальной клинической практике. *Кардиоваскулярная терапия и профилактика*, *19*(3), 232–239. https://doi.org/10.15829/1728-8800-2020-2562. EDN: https://elibrary.ru/RIYCQR
8. Осокина, А. К., Щинова, А. М., Потехина, А. В., и др. (2021). Оценка приверженности к основным прогнозмодифицирующим препаратам и контроль факторов риска ишемической болезни сердца у больных, перенёсших коронарное стентирование. *Медико-социальная экспертиза и реабилитация*, *24*(4), 13–23. https://doi.org/10.17816/MSER107293. EDN: https://elibrary.ru/WCRWJL
9. Погосова, Н. В., Бойцов, С. А., Аушева, А. К., и др. (2021). Медикаментозная терапия и приверженность к ней пациентов с ишемической болезнью сердца: результаты российской части международного многоцентрового исследования EUROASPIRE V. *Кардиология*, *61*(8), 4–13. https://doi.org/10.18087/cardio.2021.8.n1650. EDN: https://elibrary.ru/BMKKSC
10. Рузов, В. И., Комарова, Л. Г., Комаров, А. С., и др. (2020). Активность цитокиновой регуляции воспаления и эффект моно- и двойной антиагрегантной терапии у пациентов с ишемической болезнью сердца и синдромом обструктивного апноэ сна. *Кардиоваскулярная терапия и профилактика*, *19*(2), 49–54. https://doi.org/10.15829/1728-8800-2020-2261. EDN: https://elibrary.ru/TAFCZY

11. Фролова, Н. С., Шахнович, Р. М., Казначеева, Е. М., и др. (2010). Резистентность к аспирину у больных с острым коронарным синдромом. Часть 1. *Кардиоваскулярная терапия и профилактика*, *9*(6), 40–46. EDN: https://elibrary.ru/MUPPCP
12. Фролова, Н. С., Шахнович, Р. М., Казначеева, Е. М., и др. (2011). Резистентность к аспирину у больных с острым коронарным синдромом. Часть 2. *Кардиоваскулярная терапия и профилактика*, *10*(2), 47–52. https://doi.org/10.15829/1728-8800-2011-2-47-52. EDN: https://elibrary.ru/NHMIPJ
13. Хакимова, М. Б., Комаров, А. Л., Добровольский, А. Б., и др. (2022). Персонификация антиагрегантной терапии у больных с ишемической болезнью сердца: прошлое, настоящее и будущее. *Кардиологический вестник*, *17*(4), 5–15. https://doi.org/10.17116/Cardiobulletin2022170415. EDN: https://elibrary.ru/WQLCOA
14. Albert, M. A., et al. (2001). Effect of statin therapy on C-reactive protein levels. The pravastatin inflammation/CRP evaluation (PRINCE): a randomized trial and cohort study. *JAMA*, *286*(1), 64–70. https://doi.org/10.1001/jama.286.1.64
15. Baigent, C., Blackwell, L., Collins, R., et al. (2009). Aspirin in the primary and secondary prevention of vascular disease: collaborative meta-analysis of individual participant data from randomized trials. *The Lancet*, *373*, 1849–1860. https://doi.org/10.1016/S0140-6736(09)60503-1
16. Born, G. V. (1962). Aggregation of blood platelets by adenosine diphosphate and its reversal. *Nature*, *9*, 927–929. https://doi.org/10.1038/194927b0
17. Eikelboom, J. W. (2003). Aspirin resistance: a new independent predictor of vascular events? *Journal of the American College of Cardiology*, *41*(6), 966–968. https://doi.org/10.1016/s0735-1097(02)03013-9. EDN: https://elibrary.ru/BGBNCV
18. Eriksen, C. U., Rotar, O., Toft, U., & Jørgensen, T. (2021). *WHO Health Evidence Network synthesis report* (p. 8). Copenhagen. ISBN: 978-92-890-5537-6
19. Krasopoulos, G., et al. (2008). Aspirin "resistance" and risk of cardiovascular morbidity: systematic review and meta-analysis. *BMJ*, *336*, 195–198. https://doi.org/10.1136/bmj.39430.529549.BE
20. Levin, R. I. (2005). The puzzle of aspirin and sex. *New England Journal of Medicine*, *352*(13), 1293–1304. https://doi.org/10.1056/NEJMe058051
21. Mason, P. J., et al. (2005). Aspirin resistance and atherothrombotic disease. *Journal of the American College of Cardiology*, *46*(6), 986–993. https://doi.org/10.1016/j.jacc.2004.08.070
22. Masoudi, F. A., et al. (2005). Aspirin use in older patients with heart failure and coronary artery disease. *Journal of the American College of Cardiology*, *46*(6), 955–962. https://doi.org/10.1016/j.jacc.2004.07.062

23. Nardin, M., Verdoia, M., Cao, D., et al. (2023). Platelets and the atherosclerotic process: an overview of new markers of platelet activation and reactivity, and their implications in primary and secondary prevention. *Journal of Clinical Medicine*, *12*(18), 6074. https://doi.org/10.3390/jcm12186074. EDN: https://elibrary.ru/CUZYFL
24. Ridker, P. M., et al. (2005). A randomized trial of low-dose aspirin in the primary prevention of cardiovascular disease in women. *New England Journal of Medicine*, *352*(13), 1293–1304. https://doi.org/10.1056/NEJMoa050613
25. Zeng, W., Chu, T. T. W., Chow, E. Y. K., et al. (2022). Factors associated with aspirin resistance in Hong Kong Chinese patients with stable coronary heart disease using the Multiplate® analyzer and serum thromboxane B2. *Pharmaceutics*, *14*(10), 2099. https://doi.org/10.3390/pharmaceutics14102099. EDN: https://elibrary.ru/VXEJXE

References

1. Ageev, F. T., Smirnova, M. D., & Fofanova, T. V. (2023). Low adherence to therapy and ways to overcome it: the case of antiplatelet therapy. *RMJ. Medical Review*, *7*(1), 56–61. https://doi.org/10.32364/2587-6821-2023-7-1-56-61. EDN: https://elibrary.ru/MWYDWS
2. Barbarash, O. L., Karpov, Yu. A., Panov, A. V., et al. (2024). Stable ischemic heart disease. Clinical guidelines 2024. *Russian Journal of Cardiology*, *29*(9), 167–229. https://doi.org/10.15829/1560-4071-2024-6110. EDN: https://elibrary.ru/HHJJUT
3. Buryachkovskaya, L. I., Lomakin, N. V., Rusanova, A. V., et al. (2016). Resistance to acetylsalicylic acid: causes and consequences. *Heart: Journal for Practicing Physicians*, *15*(5), 379–388. https://doi.org/10.18087/RHJ.2016.5.2261. EDN: https://elibrary.ru/WVNEPT
4. Rosstat. (2Newton). *Healthcare in Russia: Statistical Compendium*. Moscow: Rosstat. 179 pp. Retrieved from: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Zdravoohran-2023.pdf
5. Lomakin, N. V., Sumarokov, A. B., Dotsenko, Yu. V., et al. (2017). Individualized approach to antiplatelet therapy: what to rely on in decision-making? *Atherothrombosis*, *(2)*, 70–78. https://doi.org/10.21518/2307-1109-2017-2-70-78. EDN: https://elibrary.ru/XHLJGF
6. Lukina, Yu. V., Martsevich, S. Yu., & Kutishenko, N. P. (2016). The Morisky-Green scale: pros and cons of the universal test, correcting mistakes. *Rational Pharmacotherapy in Cardiology*, *12*(1), 63–65. https://doi.org/10.20996/1819-6446-2016-12-1-63-65. EDN: https://elibrary.ru/VRCVIZ

7. Lukina, Yu. V., Kutishenko, N. P., Martsevich, S. Yu., et al. (2020). Questionnaires and scales for assessing treatment adherence — advantages and disadvantages of the diagnostic method in research and real clinical practice. *Cardiovascular Therapy and Prevention*, *19*(3), 232–239. https://doi.org/10.15829/1728-8800-2020-2562. EDN: https://elibrary.ru/RIYCQR
8. Osokina, A. K., Shchinova, A. M., Potekhina, A. V., et al. (2021). Assessment of adherence to key prognosis-modifying medications and risk factor control in coronary heart disease patients after coronary stenting. *Medical and Social Expertise and Rehabilitation*, *24*(4), 13–23. https://doi.org/10.17816/MSER107293. EDN: https://elibrary.ru/WCRWJL
9. Pogosova, N. V., Boytsov, S. A., Ausheva, A. K., et al. (2021). Drug therapy and adherence in patients with coronary heart disease: results of the Russian part of the international multicenter study EUROASPIRE V. *Kardiologiia*, *61*(8), 4–13. https://doi.org/10.18087/cardio.2021.8.n1650. EDN: https://elibrary.ru/BMKKSC
10. Ruzov, V. I., Komarova, L. G., Komarov, A. S., et al. (2020). Cytokine regulation of inflammation activity and the effect of mono- and dual Antiplatelet therapy in patients with coronary heart disease and obstructive sleep apnea syndrome. *Cardiovascular Therapy and Prevention*, *19*(2), 49–54. https://doi.org/10.15829/1728-8800-2020-2261. EDN: https://elibrary.ru/TAFCZY
11. Frolova, N. S., Shakhnovich, R. M., Kaznacheeva, E. M., et al. (2010). Aspirin resistance in patients with acute coronary syndrome. Part 1. *Cardiovascular Therapy and Prevention*, *9*(6), 40–46. EDN: https://elibrary.ru/MUPPCP
12. Frolova, N. S., Shakhnovich, R. M., Kaznacheeva, E. M., et al. (2011). Aspirin resistance in patients with acute coronary syndrome. Part 2. *Cardiovascular Therapy and Prevention*, *10*(2), 47–52. https://doi.org/10.15829/1728-8800-2011-2-47-52. EDN: https://elibrary.ru/NHMIPJ
13. Khakimova, M. B., Komarov, A. L., Dobrovolsky, A. B., et al. (2022). Personalization of Antiplatelet therapy in patients with coronary heart disease: past, present, and future. *Cardiological Bulletin*, *17*(4), 5–15. https://doi.org/10.17116/Cardiobulletin2022170415. EDN: https://elibrary.ru/WQLCOA
14. Albert, M. A., et al. (2001). Effect of statin therapy on C-reactive protein levels. The pravastatin inflammation/CRP evaluation (PRINCE): a randomized trial and cohort study. *JAMA*, *286*(1), 64–70. https://doi.org/10.1001/jama.286.1.64
15. Baigent, C., Blackwell, L., Collins, R., et al. (2009). Aspirin in the primary and secondary prevention of vascular disease: collaborative meta-analysis of individual participant data from randomized trials. *The Lancet*, *373*, 1849–1860. https://doi.org/10.1016/S0140-6736(09)60503-1

16. Born, G. V. (1962). Aggregation of blood platelets by adenosine diphosphate and its reversal. *Nature*, *9*, 927–929. https://doi.org/10.1038/194927b0
17. Eikelboom, J. W. (2003). Aspirin resistance: a new independent predictor of vascular events? *Journal of the American College of Cardiology*, *41*(6), 966–968. https://doi.org/10.1016/s0735-1097(02)03013-9. EDN: https://elibrary.ru/BGBNCV
18. Eriksen, C. U., Rotar, O., Toft, U., & Jørgensen, T. (2021). *WHO Health Evidence Network synthesis report* (p. 8). Copenhagen. ISBN: 978-92-890-5537-6
19. Krasopoulos, G., et al. (2008). Aspirin "resistance" and risk of cardiovascular morbidity: systematic review and meta-analysis. *BMJ*, *336*, 195–198. https://doi.org/10.1136/bmj.39430.529549.BE
20. Levin, R. I. (2005). The puzzle of aspirin and sex. *New England Journal of Medicine*, *352*(13), 1293–1304. https://doi.org/10.1056/NEJMe058051
21. Mason, P. J., et al. (2005). Aspirin resistance and atherothrombotic disease. *Journal of the American College of Cardiology*, *46*(6), 986–993. https://doi.org/10.1016/j.jacc.2004.08.070
22. Masoudi, F. A., et al. (2005). Aspirin use in older patients with heart failure and coronary artery disease. *Journal of the American College of Cardiology*, *46*(6), 955–962. https://doi.org/10.1016/j.jacc.2004.07.062
23. Nardin, M., Verdoia, M., Cao, D., et al. (2023). Platelets and the atherosclerotic process: an overview of new markers of platelet activation and reactivity, and their implications in primary and secondary prevention. *Journal of Clinical Medicine*, *12*(18), 6074. https://doi.org/10.3390/jcm12186074. EDN: https://elibrary.ru/CUZYFL
24. Ridker, P. M., et al. (2005). A randomized trial of low-dose aspirin in the primary prevention of cardiovascular disease in women. *New England Journal of Medicine*, *352*(13), 1293–1304. https://doi.org/10.1056/NEJMoa050613
25. Zeng, W., Chu, T. T. W., Chow, E. Y. K., et al. (2022). Factors associated with aspirin resistance in Hong Kong Chinese patients with stable coronary heart disease using the Multiplate® analyzer and serum thromboxane B2. *Pharmaceutics*, *14*(10), 2099. https://doi.org/10.3390/pharmaceutics14102099. EDN: https://elibrary.ru/VXEJXE

ВКЛАД АВТОРОВ

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку статьи для публикации.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

The authors contributed equally to this article.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Демьяненко Оксана Викторовна, кандидат медицинских наук, доцент кафедры внутренних болезней
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева»
ул. Комсомольская, 95, г. Орел, 302026, Российская Федерация
oksanajon13@mail.ru

Вишневский Валерий Иванович, доктор медицинских наук, профессор, зав. кафедрой внутренних болезней
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева»
ул. Комсомольская, 95, г. Орел, 302026, Российская Федерация
vishnevsky.orel@mail.ru

Снимщикова Ирина Анатольевна, ведущий научный сотрудник лаборатории новых медицинских технологий, заведующий кафедрой иммунологии и специализированных клинических дисциплин, директор Медицинского института, доктор медицинских наук, профессор
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева»
ул. Комсомольская, 95, г. Орёл, 302026, Российская Федерация
snimshikova@mail.ru

Ревякина Мария Олеговна, старший научный сотрудник лаборатории новых медицинских технологий, доцент кафедры иммунологии и специализированных клинических дисциплин, кандидат медицинских наук
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева»
ул. Комсомольская, 95, г. Орёл, 302026, Россия
revyakina_masha@mail.ru

DATA ABOUT THE AUTHORS

Oksana V. Demyanenko, Candidate of Medical Sciences, Associate Professor of the Department of Internal Medicine

Orel State University named after I.S. Turgenev
95, Komsomolskaya Str., Orel, 302026, Russian Federation
oksanajon13@mail.ru
SPIN-code: 9969-5636
ORCID: https://orcid.org/0009-0007-8170-7356

Valery I. Vishnevsky, Doctor of Medical Sciences, Professor, Head of the Department of Internal Medicine
Orel State University named after I.S. Turgenev
95, Komsomolskaya Str., Orel, 302026, Russian Federation
vishnevsky.orel@mail.ru
SPIN-code: 1445-6976
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3004-9687
ResearcherID: U-4277-2017
Scopus Author ID: 56700251100

Irina A. Snimshchikova, Leading Researcher of the Laboratory of New Medical Technologies, Head of the Department of Immunology and Specialized Clinical Disciplines, Director of the Medical Institute, Doctor of Medical Sciences, Professor
Orel State University named after I.S. Turgenev
95, Komsomolskaya Str., Orel, 302026, Russian Federation
snimshikova@mail.ru
SPIN-code: 2728-3520
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4258-963X
ResearcherID: X-6716-2019
Scopus Author ID: 57194214547

Maria O. Revyakina, Senior Researcher, Laboratory of New Medical Technologies, Associate Professor, Department of Immunology and Specialized Clinical Disciplines, Candidate of Medical Sciences
Orel State University named after I.S. Turgenev
95, Komsomolskaya Str., Orel, 302026, Russian Federation
revyakina_masha@mail.ru
SPIN-code: 4921-7530
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1593-5290
Scopus Author ID: 57326361600

Поступила 25.12.2024
После рецензирования 21.01.2025
Принята 25.01.2025

Received 25.12.2024
Revised 21.01.2025
Accepted 25.01.2025

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-4-1494 **EDN: USPALS**
УДК UDC 616.248:616-002.2

CC BY NC ND

Original article

DYNAMICS OF INFLAMMATORY MARKERS OVER SIX MONTHS IN PATIENTS WITH ASTHMA WHO UNDERWENT COVID-19

T.G. Lobova. T.I. Vitkina

Abstract

Background. Asthma is a chronic progressive heterogeneous respiratory disease accompanied by the development of a systemic inflammatory response. Due to the widespread prevalence of the novel coronavirus infection, there is concern about the impact of COVID-19 on patients with asthma. Current evidence suggests that SARS-CoV-2 activates the inflammasome response, triggering a hyperinflammatory reaction in patients with asthma, but the long-term consequences are still insufficiently studied.

Purpose. To study the features of the systemic inflammatory process over six months after SARS-COV-2 infection in individuals with asthma.

Materials and methods. In patients with mild, partially controlled asthma after mild COVID-19 infection (n = 52) and individuals with asthma (n = 34) who did not contract COVID-19, an assessment of inflammatory markers in peripheral blood was performed. Patients were examined immediately after recovery and confirmation of a negative SARS-COV-2 test result; one month, three months, and six months after the infection. The control group included conditionally healthy volunteers (n=15) who did not contract COVID-19. The cellular composition of peripheral blood, ESR, CRP, D-dimer levels were determined by classical methods; interleukin concentrations: (IL)-1β, IL-6, IL-18, NOD-like receptor protein 3 (NLRP3) inflammasome, gasdermin D (GSDMD) were measured by ELISA methods.

Results. It was revealed that for all studied parameters, there is a slow decrease in the level of indicators by six months. The levels of GSDMD, platelets, IL-1β, D-dimer, ESR, IL-6, NLRP3 after six months do not reach the values of the control group, which indicates a persistent hyperinflammatory response of the immune system.

Conclusion. Activation of NLRP3 and gasdermin D by the SARS-CoV-2 virus directly or indirectly can lead to dysregulation of inflammasome-mediated mecha-

nisms, triggering and maintaining a hyperinflammatory reaction for six months, prolonging the recovery process in patients with asthma. The study of these processes will expand the understanding of the pathological mechanism. This will allow the development of new therapeutic strategies for asthma patients who have suffered from the novel coronavirus infection.

Keywords: asthma; COVID-19; long-term consequences; inflammatory markers; NLRP3; gasdermin D

For citation. Lobova, T. G., & Vitkina, T. I. (2025). Dynamics of inflammatory markers over six months in patients with asthma who underwent COVID-19. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(4), 468-481. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-4-1494

Научная статья

ДИНАМИКА МАРКЕРОВ ВОСПАЛЕНИЯ В ТЕЧЕНИЕ ШЕСТИ МЕСЯЦЕВ У ПАЦИЕНТОВ С БРОНХИАЛЬНОЙ АСТМОЙ, ПЕРЕНЕСШИХ COVID-19

Т.Г. Лобова, Т.И. Виткина

Аннотация

Обоснование. Бронхиальная астма – хроническое прогрессирующее гетерогенное респираторное заболевание, сопровождающееся развитием системной воспалительной реакции. В связи с широкой распространенностью новой коронавирусной инфекции существует обеспокоенность по поводу воздействия COVID-19 на пациентов с бронхиальной астмой. Современные данные свидетельствуют о том, что SARS-CoV-2 активирует ответ инфламмасом, вызывая гипервоспалительную реакцию у пациентов с бронхиальной астмой, но долгосрочные последствия все еще недостаточно изучены.

Цель работы. Изучить особенности системного воспалительного процесса в течение шести месяцев после заражения SARS-COV-2 у лиц с бронхиальной астмой.

Материалы и методы. У пациентов с легкой, частично контролируемой бронхиальной астмой после легкой формы заражения COVID-19 (n = 52) и лиц с бронхиальной астмой (n = 34), которые не были инфицированы COVID-19, была проведена оценка маркеров воспаления в периферической крови. Пациенты были обследованы сразу после выздоровления и подтверждения отрица-

тельного результата теста на SARS-COV-2; через месяц, три месяца и шесть месяцев после заражения. В контрольную группу вошли условно здоровые добровольцы (n=15), которые не заразились COVID-19. Клеточный состав периферической крови, СОЭ, уровень СРБ, D-димера определяли классическими методами; концентрацию интерлейкинов: (IL)-1β, IL-6, IL-18, инфламмасомы NOD-подобного рецептора белка 3 (NLRP3), газдермина D (GSDMD) определяли методами иммуноферментного анализа.

Результаты. Было выявлено, что по всем изучаемым параметрам наблюдается медленное снижение уровня показателей к шести месяцам. Уровни GSDMD, тромбоцитов, IL-1β, D-димера, СОЭ, IL-6, NLRP3 через полгода не достигают значений контрольной группы, что свидетельствует о стойкой гиперинфекционной реакции иммунной системы.

Заключение. Активация NLRP3 и gasdermin D вирусом SARS-CoV-2 прямо или косвенно может привести к нарушению регуляции механизмов, опосредованных инфламмасомами, вызывая и поддерживая гипервоспаление реакцию в течение шести месяцев, продлевая процесс выздоровления у пациентов с бронхиальной астмой. Изучение этих процессов расширит понимание патологического механизма. Это позволит разработать новые терапевтические стратегии для пациентов с астмой, которые пострадали от новой коронавирусной инфекции.

Ключевые слова: бронхиальная астма; COVID-19; отдаленные последствия; маркеры воспаления; NLRP3; газдермин D

Для цитирования. Лобова, Т. Г., & Виткина, Т. И. (2025). Динамика маркеров воспаления в течение шести месяцев у пациентов с бронхиальной астмой, перенесших COVID-19. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(4), 468-481. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-4-1494

Introduction

Asthma represents a global health problem that affects from 1% to 18% of the population. Asthma is a chronic lung disease characterized by systemic inflammation, mucus hyperproduction, hyperreactivity, bronchial remodeling, and resistance to applied treatment methods [5].

During the widespread prevalence of the novel coronavirus infection caused by the SARS-CoV-2 virus, patients with asthma require special attention, as asthma is associated with reduced antiviral protection and disturbances in the functioning of the immune system. Due to the fact that COVID-19 also affects the respiratory organs, it is logical to assume that patients with asthma are most vulnerable to COVID-19. The proven role of respiratory viral infections as both

triggers and inducers of the disease raises concerns about the increased susceptibility of asthma patients to coronavirus infection. The question of how the recovery process after COVID-19 proceeds in patients with asthma remains open. It has been shown that some patients suffer from long-term persistent shortness of breath and weakness, which greatly reduces the quality of life and requires prolonged rehabilitation.

SARS-CoV-2 enters host cells through angiotensin-converting enzyme-2 (ACE-2) receptors. ACE2 is a protein that performs various roles, such as a catalyst, amino acid transporter, or viral receptor. ACE2 receptors are ubiquitously expressed on cells of the gastrointestinal tract, blood vessels, and in large numbers in the lungs [6]. This increases the percentage of virus penetration into lung tissue and the circulatory system, causing the activation of immunocompetent cells and polyprotein complexes, such as inflammasomes, which in turn trigger a cascade of reactions via caspase-1 with the formation of proinflammatory cytokines.

The novel coronavirus infection caused by SARS-CoV-2 is characterized by a systemic hyperinflammatory response, elevated levels of circulating inflammatory markers, including C-reactive protein (CRP), D-dimer, and a wide range of inflammatory cytokines associated with an unfavorable disease outcome. The proinflammatory cytokines IL-1β and IL-18 play a significant role in lung damage and respiratory distress caused by SARS-CoV-2 (Conti et al., 2020; Satis et al., 2021). IL-1β plays an important role in attracting immune cells to the site of infection, as well as in stimulating cells to produce and secrete a number of inflammation mediators, including IL-6 and C-reactive protein (Slaats et al., 2016). IL-18 is associated with cytopenia, disease severity, being one of the leading cytokines of macrophage activation syndrome [7].

The production of IL-1β and IL-18 depends on the activation of inflammasomes upon perception of molecular patterns associated with PAMPs/DAMPs by intracellular sensors of innate immunity (Martinon et al., 2002; Sharma and Kanneganti, 2016). Inflammasomes activate a class of caspases known as inflammatory caspases [8; 9]. Their main substrates are cytokines (IL-1β, IL-18), which are important mediators of the hyperinflammatory reaction. There is evidence of both the triggering of the inflammasome response in the acute course of SARS-CoV-2 [10; 11] and the significance of this mechanism in the aggravation of BA. However, at present, the dynamics of the attenuation of the hyperinflammatory process in patients with asthma who have suffered from COVID-19 remains unclear.

Purpose. To study the features of the systemic inflammatory process over six months after SARS-COV-2 infection in individuals with BA.

Materials and methods

The study included 101 people (age 42±5 years), of which 85 were patients with asthma, and 15 people were included in the control group. The inclusion criteria were the presence of mild, partially controlled asthma, without exacerbation; a previous novel coronavirus infection confirmed by a PCR test. The exclusion criteria were the presence of chronic diseases of internal organs in the acute stage, diabetes mellitus, oncological diseases, and bad habits in the subjects.

The main group (52 people) included individuals with mild, partially controlled asthma who received personalized basic therapy with glucocorticoids (ICS) and symptomatic (for symptom relief) therapy, and who had a positive PCR result for SARS-CoV-2. The novel coronavirus infection was mild in severity.

The comparison group consisted of 34 people with BA who did not contract SARS-CoV-2; at the time of the examination, a negative PCR result was detected. The group was matched by sex, age, and received therapy. The control group was represented by 15 conditionally healthy volunteers who did not contract COVID-19. The examination was performed at different time periods: 0 - early (after recovery and confirmation of a negative SARS-CoV-2 test result), then after 1, 3, and 6 months. At the first visit, participants answered questions from a questionnaire about the course and state of the main disease - asthma, as well as questions including the timing of infection with the novel coronavirus infection, a description of the condition (complaints), prescribed medications, and allergic reactions. Informed consent was obtained from all participants in accordance with the requirements of the Declaration of Helsinki (2013) according to a protocol approved by the Biomedical Ethics Committee (Protocol No. 15/2021 dated 27.12.2021).

Throughout the study period, testing for IgM to SARS-CoV-2 was performed by the enzyme immunoassay method using Vector-BEST kits and a VERP 2000 analyzer (SIEMENS, Germany). Control sera that did not contain IgM to SARS-CoV-2 were used in the work.

Biochemical, hematological, and coagulological studies were performed directly on the day of biomaterial collection. For enzyme immunoassay studies, the selected blood serum was stored at a temperature of minus 80°C for no more than 3 months. Samples with hemolysis and high lipid content were excluded. The content of hematological parameters of peripheral blood was determined using a Mindray 6800 analyzer (China). Morphological changes in blood cells were determined by the microscopic method using an Axioscope

5 microscope (Carl Zeiss, Germany) at magnifications of x10 and x100. The content of C-reactive protein (CRP) was determined using Rendox FN3452 and CP 7950 test systems on a Sapfir 500 biochemical analyzer (Japan). D-dimer was determined using a TS-190 analyzer (China) with reagents from Technologia-Standard (Russia). The content of the NOD-like receptor protein 3 (NLRP3) inflammasome (BIOMATIK ELISA Kit, Israel), gasdermin D (GSDMD) (Human GSDMD Simple Step ELISA Kit Abcam, UK), and interleukins (IL) 1β, 6, and 18 in peripheral blood serum (Vector-BEST, Russia) was determined by ELISA on a VERP 2000 analyzer (SIEMENS, Germany).

Statistical analysis

Statistical processing was performed using the Statistica 10.0 program (Statsoft). Data were presented as median and quartiles. The statistical significance of differences between groups was assessed using the Kruskal-Wallis test. The critical level of significance (p) when testing statistical hypotheses was accepted at $p < 0.05$.

Results

In the group of patients with BA, compared to the control group, an increase in a number of inflammatory markers was observed: gasdermin D by 1076% ($p < 0.001$), CRP by 215% ($p < 0.05$), D-dimer by 214% ($p < 0.05$), ESR by 167% ($p < 0.05$), and monocytes by 114% ($p < 0.05$). The cytokine status was also characterized by high values: IL-18 increased by 141% ($p < 0.05$), IL-6 by 124% ($p < 0.05$), and IL-1β by 116% ($p < 0.05$) (Fig. 1).

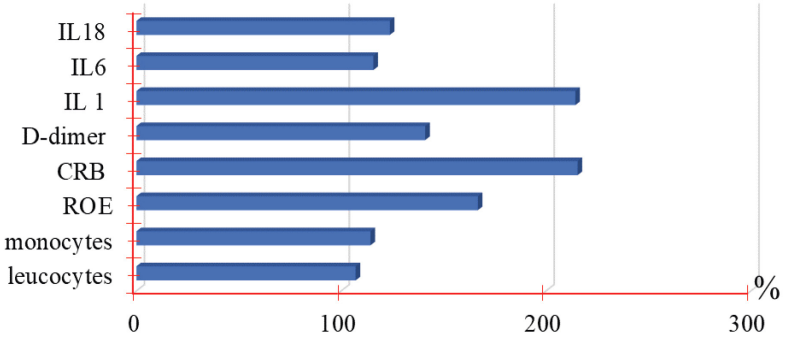


Fig. 1. Markers of inflammation in patients with asthma.

Note: the indicators are presented as a percentage relative to the control group, the parameters of which are taken as 100%.

In patients with asthma who suffered from the novel coronavirus infection (COVID-19), in the early period (after recovery and confirmation of a negative test result for the presence of IgM SARS-CoV-2), compared to patients with asthma who did not contract the novel coronavirus infection, an increase in the following indicators was detected: D-dimer by 300% ($p < 0.001$), ESR by 183% ($p < 0.05$), and CRP by 139% ($p < 0.05$). An increase in the level of interleukin IL-1β by 234% ($p < 0.001$) was shown in Fig. 2.

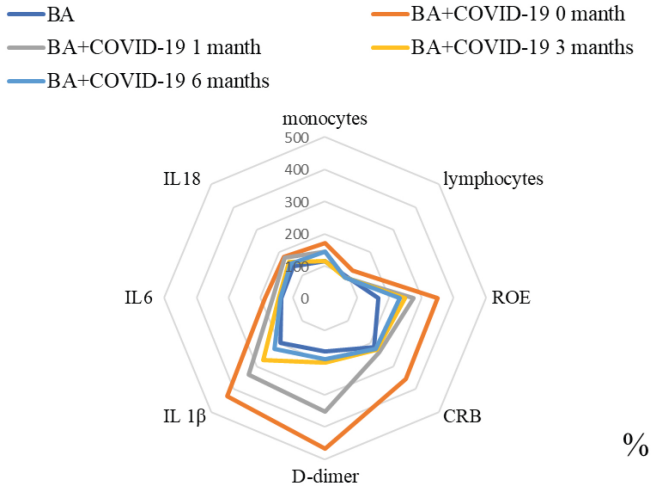


Fig. 2. Dynamics of inflammation markers in 0, 1, 3, 6 months patients with asthma who underwent coronavirus infection.

Note: the indicators are presented as a percentage relative to the control group, the parameters of which are taken as 100%.

One month after the recovery of patients with asthma who suffered from COVID-19, in comparison with BA + COVID-19 at 0 months of recovery from the infection, a slow decrease in indicators was observed: D-dimer by 115% ($p < 0.05$), ESR by 75% ($p < 0.05$), and CRP by 116% ($p < 0.05$). A decrease in interleukin levels was noted: IL-1β by 234% ($p < 0.001$), IL-6 by 49% ($p < 0.05$), and IL-18 by 39% ($p < 0.05$).

Three months after recovery, in patients with BA who suffered from COVID-19, compared to the previous period (BA+COVID-19 1 month), a gradual decrease in parameters was also observed: D-dimer by 152% ($p < 0.05$), ESR by 20% ($p < 0.05$), and CRP by 16% ($p < 0.05$). A decrease in interleukin

levels was noted: IL-1β by 64% ($p < 0.05$), IL-6 by 20% ($p < 0.05$), and IL-18 by 16% ($p < 0.05$).

In patients with BA who suffered from coronavirus infection, six months after the infection, compared to the previous period (BA+COVID-19 3 months), inflammatory markers continued to decrease: D-dimer by 10% ($p < 0.05$), ESR by 17% ($p < 0.05$), and CRP by 5% ($p < 0.05$). A decrease in interleukin levels was detected: IL-1β by 48% ($p < 0.05$), IL-6 by 3% ($p < 0.05$), and IL-18 by 9% ($p < 0.05$).

The decrease in a number of parameters, such as D-dimer, ESR, CRP, IL-1β, IL-6, and IL-18, over six months occurred slowly, not reaching the values of the group of patients with BA who did not contract coronavirus infection by six months.

The level of NLRP3 was higher by 135% ($p < 0.001$) and gasdermin D by 976% ($p < 0.001$) in patients with BA compared to the indicators of patients in the control group. In patients with BA+COVID-19 at 0 months, relative to patients with BA, the level of NLRP3 was increased by 503% ($p < 0.001$) and gasdermin D by 892% ($p < 0.001$). Over time, in patients with BA+COVID-19 at 1 month compared to the previous period, NLRP3 decreased by 142% ($p < 0.001$) and gasdermin D by 394% ($p < 0.001$). Three months after recovery, compared to patients with BA+COVID-19 at 1 month, NLRP3 decreased by 78% ($p < 0.05$) and gasdermin D by 121% ($p < 0.05$). After six months, NLRP3 decreased by 78% ($p < 0.05$) and gasdermin D by 121% ($p < 0.05$) compared to patients with BA+COVID-19 at 3 months (Fig. 3).

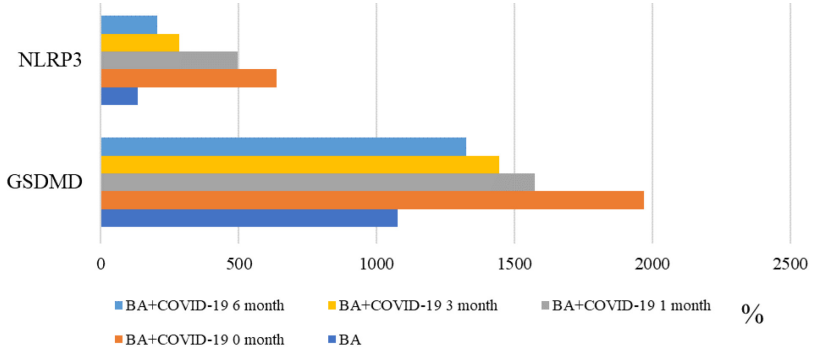


Fig. 3. Dynamics of NLRP3 and gasdermine D in patients with Asthma who suffered a new coronavirus infection.

Note: the indicators are presented as a percentage relative to the control group, the parameters of which are taken as 100%.

There was a tendency towards a decrease in NLRP3 and gasdermin D at the decreed time points (one month, three months, six months) in patients with BA who suffered from the novel coronavirus infection, but the values after six months exceeded the level of these parameters in the group of patients with BA who did not contract COVID-19.

Discussion

BA, being a chronic, progressive lung disease, requires special attention when various respiratory infections are attached [12]. In the case of the novel coronavirus infection in individuals with BA, such important systems as the respiratory, cardiovascular, nervous system, and general metabolic processes are affected, and a hyperinflammatory response may develop [13]. The multifactorial inflammatory profile of BA is superimposed by the reaction of the immune system to the novel coronavirus infection, creating conditions for the mass death of immunocompetent cells [14]. In the presence of an elevated CRP concentration, the activity of immune system cells with cytotoxic properties increases, phagocytosis accelerates, the complement system comes into play, and metabolic disorders increase. This forms the prerequisites for a long recovery and, in some cases, the development of post-COVID syndrome.

The conducted study showed that in patients with asthma who have suffered from a novel coronavirus infection, the manifestations of a hyperinflammatory reaction are more active for 6 months than in individuals with asthma who have not contracted COVID-19. The process of recovery of indicators is slow and does not reach the values in patients with BA. The issue of risks and prognosis for patients with bronchial asthma in the long-term period after COVID-19 infection requires further study.

Conclusion

In patients with BA who have suffered from COVID-19, the inflammatory process proceeds much more actively than in patients with BA who have not contracted coronavirus infection. The revealed violations of the pool of immunocompetent cells that provide protective mechanisms of innate and acquired immunity demonstrate the presence of a hyperinflammatory process, indicating a high level of hematopoietic activity of the bone marrow. The hyperinflammatory process is largely supported by the activity of NLRP3 and gasdermin D, providing an active inflammatory profile in this category of patients after six months.

Ethics Committee Conclusion. The clinical study was approved by the Ethics Committee (Protocol No. 15/2021 dated 27.12.2021).

Informed Consent. Informed consent was obtained from all subjects who participated in the study.

Conflict of Interest Information. The authors declare that the presented article, its topic, subject, and content do not affect competing interests.

Список литературы

1. Виткина, Т. И., & Лобова, Т. Г. (2022). Динамика параметров периферической крови у здоровых добровольцев, перенёсших COVID-19. В: *Актуальные проблемы патофизиологии: Сборник научных статей Международной научно-практической конференции* (Чита, 11 ноября 2022 года) / Под общей редакцией Н. В. Ларёвой (сс. 39–41). Чита: Читинская государственная медицинская академия. EDN: https://elibrary.ru/ZKDYMV
2. Vitkina, T. I., Lobova, T. G., Bogomaz, T. T., & Korableva, E. V. (2024). Inflammasome-mediated mechanisms of systemic inflammation in COVID-19 and asthma. *Russian Open Medical Journal*, *13*, e0201. https://doi.org/10.15275/rusomj.2024.0201. EDN: https://elibrary.ru/TFBJHT
3. Глазова, Т. Г., и др. (2011). Изменения свойств тромбоцитов и параметров гемостаза при персистирующем течении бронхиальной астмы у детей. *Казанский медицинский журнал*, *92*(4), 566–568. EDN: https://elibrary.ru/NXZSCX
4. Коржева, И. Ю., и др. (2012). Нарушение микрогемоциркуляции у больных с бронхолёгочными заболеваниями и методы его изучения. *Терапевтический архив*, *84*(6), 65–67. EDN: https://elibrary.ru/QZLMZP
5. Щелканов, М. Ю., & Колобухина, Л. В. (2020). COVID-19: этиология, клиническая картина, лечение. *Российский журнал инфекций и иммунитета*, *10*(3), 421–445. https://doi.org/10.15789/2220-7619-CEC-1473. EDN: https://elibrary.ru/IMAADB
6. *A global strategy for the treatment and prevention of bronchial asthma* (Rev. 2011). Ed. Belyaevsky, A. S. Moscow: Russian Respiratory Society, 108 p.
7. Dounce-Cuevas, C. A., Flores-Flores, A., Bazán, M. S., et al. (2023). Asthma and COVID-19: a controversial relationship. *Virology Journal*, *20*, 207. https://doi.org/10.1186/s12985-023-02174-0. EDN: https://elibrary.ru/ALKJMV
8. Ge, Q., Chen, X., Zhao, Y., Mu, H., & Zhang, J. (2021). Modulatory mechanisms of NLRP3: potential roles in inflammasome activation. *Life Sciences*, *267*, 118918. https://doi.org/10.1016/j.lfs.2020.118918. EDN: https://elibrary.ru/LZWFMY

9. Global Initiative for Asthma. (2022). *Global strategy for asthma management and prevention* [Updated 2022]. https://ginasthma.org/wp-content/uploads/2022/07/GINAMain-Report-2022-FINAL-22-07-WMS.pdf (дата обращения: 24.04.2023)
10. Lombardi, C., Gani, F., Berti, A., et al. (2021). Asthma and COVID-19: a dangerous liaison? *Asthma Research and Practice*, *7*, 9. https://doi.org/10.1186/s40733-021-00075-z. EDN: https://elibrary.ru/MAXJNU
11. Paul, O., Tao, J. Q., West, E., et al. (2022). Pulmonary vascular inflammation with fatal coronavirus disease 2019 (COVID-19): possible role for the NLRP3 inflammasome. *Respiratory Research*, *23*, 25. https://doi.org/10.1186/s12931-022-01944-8. EDN: https://elibrary.ru/GJCCVF
12. Satış, H., Özger, H. S., & Aysert Yıldız, P. (2021). Prognostic value of interleukin-18 and its association with other inflammatory markers and disease severity in COVID-19. *Cytokine*, *137*, 155302. Epub 2020 Sep 29. https://doi.org/10.1016/j.cyto.2020.155302. EDN: https://elibrary.ru/LJMZUC
13. Simpson, J. L., Phipps, S., Baines, K. J., Oreo, K. M., Gunawardhana, L., & Gibson, P. G. (2014). Elevated expression of the NLRP3 inflammasome in neutrophilic asthma. *European Respiratory Journal*, *43*(4), 1067–1076. https://doi.org/10.1183/09031936.00105013
14. Xiangyong, Q., Sihao, Z., Qibin, S., Huadong, P., & Pingfeng, Z. (2023). Fantastic voyage: The journey of NLRP3 inflammasome activation. *Genes & Diseases*, *11*(2), 819–829. https://doi.org/10.1016/j.gendis.2023.01.009
15. Lombardi, C., Gani, F., Berti, A., et al. (2021). Asthma and COVID-19: a dangerous liaison? *Asthma Research and Practice*, *7*, 9. https://doi.org/10.1186/s40733-021-00075-z. EDN: https://elibrary.ru/MAXJNU
16. Paul, O., Tao, J. Q., West, E., et al. (2022). Pulmonary vascular inflammation with fatal coronavirus disease 2019 (COVID-19): possible role for the NLRP3 inflammasome. *Respiratory Research*, *23*, 25. https://doi.org/10.1186/s12931-022-01944-8. EDN: https://elibrary.ru/GJCCVF
17. Satış, H., Özger, H. S., & Aysert Yıldız, P. (2021). Prognostic value of interleukin-18 and its association with other inflammatory markers and disease severity in COVID-19. *Cytokine*, *137*, 155302. https://doi.org/10.1016/j.cyto.2020.155302. EDN: https://elibrary.ru/LJMZUC
18. Simpson, J. L., Phipps, S., Baines, K. J., Oreo, K. M., Gunawardhana, L., & Gibson, P. G. (2014). Elevated expression of the NLRP3 inflammasome in neutrophilic asthma. *European Respiratory Journal*, *43*(4), 1067–1076. https://doi.org/10.1183/09031936.00105013
19. Weng, J., Li, Y., Li, J., et al. (2021). Gastrointestinal sequelae 90 days after discharge for COVID-19. *The Lancet Gastroenterology & Hepatology*, *6*(5), 344–

346. https://doi.org/10.1016/S2468-1253(21)00076-5. EDN: https://elibrary.ru/WZQTZJ

References

1. Vitkina, T. I., & Lobova, T. G. (2022). Dynamics of peripheral blood parameters in healthy volunteers after COVID-19. In *Actual problems of pathophysiology: Collection of scientific articles of the International Scientific and Practical Conference* (Chita, November 11, 2022) (pp. 39–41). Chita: Chita State Medical Academy. EDN: https://elibrary.ru/ZKDYMV
2. Vitkina, T. I., Lobova, T. G., Bogomaz, T. T., & Korableva, E. V. (2024). Inflammasome-mediated mechanisms of systemic inflammation in COVID-19 and asthma. *Russian Open Medical Journal*, *13*, e0201. https://doi.org/10.15275/rusomj.2024.0201. EDN: https://elibrary.ru/TFBJHT
3. Glazova, T. G., et al. (2011). Changes in platelet properties and haemostasis parameters in children with persistent bronchial asthma. *Kazan Medical Journal*, *92*(4), 566–568. EDN: https://elibrary.ru/NXZSCX
4. Korzheva, I. Yu., et al. (2012). Microcirculation disorders in patients with bronchopulmonary diseases and methods for their study. *Therapeutic Archive*, *84*(6), 65–67. EDN: https://elibrary.ru/QZLMZP
5. Shchelkanov, M. Yu., & Kolobukhina, L. V. (2020). COVID-19: etiology, clinical presentation, treatment. *Russian Journal of Infection and Immunity*, *10*(3), 421–445. https://doi.org/10.15789/2220-7619-CEC-1473. EDN: https://elibrary.ru/IMAADB
6. *A global strategy for the treatment and prevention of bronchial asthma* (Rev. 2011). Ed. Belyaevsky, A. S. Moscow: Russian Respiratory Society, 108 p.
7. Dounce-Cuevas, C. A., Flores-Flores, A., Bazán, M. S., et al. (2023). Asthma and COVID-19: a controversial relationship. *Virology Journal*, *20*, 207. https://doi.org/10.1186/s12985-023-02174-0. EDN: https://elibrary.ru/ALKJMV
8. Ge, Q., Chen, X., Zhao, Y., Mu, H., & Zhang, J. (2021). Modulatory mechanisms of NLRP3: potential roles in inflammasome activation. *Life Sciences*, *267*, 118918. https://doi.org/10.1016/j.lfs.2020.118918. EDN: https://elibrary.ru/LZWFMY
9. Global Initiative for Asthma. (2022). *Global strategy for asthma management and prevention* [Updated 2022]. https://ginasthma.org/wp-content/uploads/2022/07/GINAMain-Report-2022-FINAL-22-07-WMS.pdf (дата обращения: 24.04.2023)
10. Lombardi, C., Gani, F., Berti, A., et al. (2021). Asthma and COVID-19: a dangerous liaison? *Asthma Research and Practice*, *7*, 9. https://doi.org/10.1186/s40733-021-00075-z. EDN: https://elibrary.ru/MAXJNU

11. Paul, O., Tao, J. Q., West, E., et al. (2022). Pulmonary vascular inflammation with fatal coronavirus disease 2019 (COVID-19): possible role for the NLRP3 inflammasome. *Respiratory Research*, *23*, 25. https://doi.org/10.1186/s12931-022-01944-8. EDN: https://elibrary.ru/GJCCVF
12. Satış, H., Özger, H. S., & Aysert Yıldız, P. (2021). Prognostic value of interleukin-18 and its association with other inflammatory markers and disease severity in COVID-19. *Cytokine*, *137*, 155302. Epub 2020 Sep 29. https://doi.org/10.1016/j.cyto.2020.155302. EDN: https://elibrary.ru/LJMZUC
13. Simpson, J. L., Phipps, S., Baines, K. J., Oreo, K. M., Gunawardhana, L., & Gibson, P. G. (2014). Elevated expression of the NLRP3 inflammasome in neutrophilic asthma. *European Respiratory Journal*, *43*(4), 1067–1076. https://doi.org/10.1183/09031936.00105013
14. Xiangyong, Q., Sihao, Z., Qibin, S., Huadong, P., & Pingfeng, Z. (2023). Fantastic voyage: The journey of NLRP3 inflammasome activation. *Genes & Diseases*, *11*(2), 819–829. https://doi.org/10.1016/j.gendis.2023.01.009
15. Lombardi, C., Gani, F., Berti, A., et al. (2021). Asthma and COVID-19: a dangerous liaison? *Asthma Research and Practice*, *7*, 9. https://doi.org/10.1186/s40733-021-00075-z. EDN: https://elibrary.ru/MAXJNU
16. Paul, O., Tao, J. Q., West, E., et al. (2022). Pulmonary vascular inflammation with fatal coronavirus disease 2019 (COVID-19): possible role for the NLRP3 inflammasome. *Respiratory Research*, *23*, 25. https://doi.org/10.1186/s12931-022-01944-8. EDN: https://elibrary.ru/GJCCVF
17. Satış, H., Özger, H. S., & Aysert Yıldız, P. (2021). Prognostic value of interleukin-18 and its association with other inflammatory markers and disease severity in COVID-19. *Cytokine*, *137*, 155302. https://doi.org/10.1016/j.cyto.2020.155302. EDN: https://elibrary.ru/LJMZUC
18. Simpson, J. L., Phipps, S., Baines, K. J., Oreo, K. M., Gunawardhana, L., & Gibson, P. G. (2014). Elevated expression of the NLRP3 inflammasome in neutrophilic asthma. *European Respiratory Journal*, *43*(4), 1067–1076. https://doi.org/10.1183/09031936.00105013
19. Weng, J., Li, Y., Li, J., et al. (2021). Gastrointestinal sequelae 90 days after discharge for COVID-19. *The Lancet Gastroenterology & Hepatology*, *6*(5), 344–346. https://doi.org/10.1016/S2468-1253(21)00076-5. EDN: https://elibrary.ru/WZQTZJ

ДАННЫЕ ОБ АВТОРЕ

Лобова Татьяна Геннадьевна, аспирант

Владивостокский филиал Дальневосточного научного центра физиологии и патологии дыхания – Научно-исследовательский институт медицинской климатологии и восстановительного лечения

ул. Русская, 73Г, г. Владивосток, 690105, Российская Федерация
lobova.tg@dvfu.ru

Виткина Татьяна Исааковна, д.б.н., профессор РАН, заведующая лабораторией медицинской экологии и рекреационных ресурсов
Владивостокский филиал Дальневосточного научного центра физиологии и патологии дыхания – Научно-исследовательский институт медицинской климатологии и восстановительного лечения
ул. Русская, 73Г, г. Владивосток, 690105, Российская Федерация
tash30@mail.ru

DATA ABOUT THE AUTHORS

Tatyana G. Lobova, Graduate Student
Vladivostok Branch of Far Eastern Scientific Center of Physiology and Pathology of Respiration – Institute of Medical Climatology and Rehabilitative Treatment
73G, Russkaya Str., Vladivostok, 690105, Russian Federation
lobova.tg@dvfu.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1721-6548

Tatyana I. Vitkina, Doctor of Biological Sciences, Professor of the Russian Academy of Sciences, Head of the Laboratory of Medical Ecology and Recreational Resources
Vladivostok Branch of Far Eastern Scientific Center of Physiology and Pathology of Respiration – Institute of Medical Climatology and Rehabilitative Treatment
73G, Russkaya Str., Vladivostok, 690105, Russian Federation
tash30@mail.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1009-9011
Researcher ID: F-5250-2016
Scopus Autor ID: 22954655800

Поступила 03.12.2024
После рецензирования 19.01.2025
Принята 30.01.2025

Received 03.12.2024
Revised 19.01.2025
Accepted 30.01.2025

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-4-1228 **EDN: NIGFMJ**
УДК 612

CC BY NC ND

Научная статья

НЕЙРОФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ КОРРЕЛЯТЫ ОБРАБОТКИ ЗНАЧИМОЙ СЛУХОВОЙ ИНФОРМАЦИИ У МОЛОДЫХ ЛЮДЕЙ С МИОПИЕЙ 17-19 ЛЕТ

Р.Н. Зеленцов, И.С. Кожевникова, Л.В. Поскотинова

Аннотация

Обоснование. Миопия у молодых лиц обусловливает относительный дефицит поступления зрительной афферентной информации, а также компенсаторное напряжение нейрофизиологических механизмов обработки слуховой информации на уровне неокортекса. Высокие темпы цифровизации образования и образа жизни у молодых лиц, особенно первого года обучения в ВУЗе, обостряют не только риск прогрессирования миопии, но и напряжение процессов обработки информации. Представляется важным определить нейрофизиологические корреляты напряжения процессов обработки слуховой информации как потенциальных нейромаркеров риска развития когнитивных нарушений у миопов.

Цель. Исследовать изменение характеристик когнитивных вызванных потенциалов (ВП) Р300 умолодых людей с миопией, 17–19 лет.

Материалы и методы. 66 девушек и 30 юношей было привлечено для участия в исследовании (96 человек), 17–19 лет, средний возраст которых составил 18,3±0,1 лет. В данном исследовании 59 человек имели установленный диагноз «миопия», все участники исследования обучались в медицинском университете г. Архангельска. В ходе исследования мы определяли как некорригированную, так и максимально корригированную остроту зрения, что позволяет получить полное представление о состоянии зрительной функции. Кроме того, мы измеряли величину клинической рефракции в диоптриях, что является важным показателем для диагностики различных нарушений зрения, таких как миопия, гиперметропия и астигматизм. Оценка качественных изменений в зрении также играла ключевую роль в нашем исследовании, так как она позволяет выявить не только количественные, но и качественные аспекты зрительного восприятия. Запас относительной аккомодации, измеряемый в диоптриях, был еще одним

важным параметром, который мы оценивали.Определяли латентность и амплитуду компонентов когнитивных слуховых ВП Р300 с использованием электроэнцефалографа «НейронСпектр-4/ВПМ» («Нейрософт», Россия). Полученные результаты обрабатывали с помощью статистического пакета программ SPSS.

Результаты. У молодых людей с миопией в возрасте 17–19 лет наблюдается удлинение латентности компонента Р3, то есть более длительное время в левых лобных и париетальных областях головного мозга по сравнению с контрольной группой. Фиксируется увеличение амплитуды пика компонента Р3 в левых лобных и центральных областях мозга. Параметры амплитуды N2-P3 в затылочных областях головного мозга у лиц с миопией оказались выше, чем у здоровых испытуемых, статистически значимо справа. Выявлены достоверные различия в выраженности передне-заднего градиента амплитуд P2-N2 между группами миопов и здоровых участников исследования.

Заключение. У миопов 17–19 лет выявлено удлинение времени принятия решения с вовлечением большего объема нейрональных ресурсов, в том числересурсов зрительной и задне-височной коры головного мозга, при восприятии и распознавании значимой слуховой информации в сравнении с офтальмологически здоровыми лицами.

Ключевые слова: молодые люди; миопия; когнитивные слуховые вызванные потенциалы Р300; цифровизация

Для цитирования. Зеленцов, Р. Н., Кожевникова, И. С., & Поскотинова, Л. В. (2025). Нейрофизиологические корреляты обработки значимой слуховой информации у молодых людей с миопией 17-19 лет. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(4), 482-500. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-4-1238

Original article

NEUROPHISIOLOGICAL CORRELATES OF PROCESSING SIGNIFICANT AUDITORY INFORMATION IN YOUNG PEOPLE WITH MYOPIA 17-19 YEARS OLD

R.N. Zelentsov, I.S. Kozhevnikova, L.V. Poskotinova

Abstract

Background. Myopia in young people causes a relative deficit in the receipt of visual afferent information, as well as compensatory tension of neurophysiological mechanisms of processing auditory information at the level of the neo-

cortex. The high rates of digitalization of education and lifestyle among young people, especially the first year of university studies, exacerbate not only the risk of myopia progression, but also the stress of information processing processes. It is important to identify neurophysiological correlates of stress in auditory information processing processes as potential neuromarkers of the risk of cognitive impairment in myopes.

Purpose. To study the characteristics of cognitive evoked potentials (VP) of P300 in young people aged 17-19 with myopia.

Materials and methods. 96 people, 66 girls and 30 boys participated in the study. The average age of the participants was 18.3±0.1 years. 37 participants without ophthalmopathology and 59 people with an established diagnosis of "myopia" from among the students of the medical University of Arkhangelsk. The participants were assessed for uncorrected and maximally corrected visual acuity, the value of clinical refraction (in diopters), qualitative changes, as well as the margin of relative accommodation (in diopters). The latency and amplitude of the components of cognitive auditory VP R300 were determined using the NeuronSpectr-4/VPM electroencephalograph (Neurosoft, Russia). The obtained results were processed using the statistical software package SPSS.

Results. In myopes aged 17-19 years, compared with people without ophthalmopathology, the decision-making time (latency of the P3 component) in the left frontal and parietal regions of the brain is longer, and the peak amplitude of the P3 component in the left frontal and central parts of the brain is increased. The amplitude parameters of the N2-P3 component in individuals with myopia in the occipital regions of the brain were higher than in healthy participants (statistically significantly on the right) with significant differences in the severity of the anterior–posterior gradient of the amplitudes of the P2-N2 component in myopes and healthy individuals.

Conclusion. In myopes aged 17-19 years, an elongation of decision-making time was revealed with the involvement of a larger amount of neuronal resources, including the resources of the visual and posterior temporal cortex of the brain, when perceiving and recognizing significant auditory information in comparison with ophthalmologically healthy individuals.

Keywords: young people; myopia; cognitive auditory evoked potentials P300; digitalization

For citation. Zelentsov, R. N., Kozhevnikova, I. S., & Poskotinova, L. V. (2025). Neurophysiological correlates of processing significant auditory information in young people with myopia 17-19 years old. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(4), 482-500. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-4-1238

Введение

По данным исследований миопия становится всё более распространённой, проявляется в раннем возрасте, а при прогрессировании может привести к ухудшению зрения, что ограничивает профессиональный выбор, вызывает слепоту и, как следствие, приводит к инвалидности по зрению. От 23 до 44,6% всех людей с инвалидностью по зрению страдают от миопии высокой степени [12].

В мире миопией страдает 1,6 миллиарда человек, и ожидается, что к 2020 году это число увеличится до 2,5 миллиарда, а к 2050 году – до 4758 миллионов [4].

В развитых странах мира миопия встречается у 30–55% населения, а в некоторых странах достигает 95%. При этом 16–38% случаев приходится на миопию высокой степени [5,6,14,19]. У 79,3% населения Сингапура встречается миопия, а в США – у 41,6% людей [16]. В Тайване и Китае близорукость встречается у 95,9% студентов [7; 17].

В ходе нашего недавнего исследования [2], которое проводилось в Архангельской области, мы сосредоточились на оценке различных аспектов зрения у участников. Наши результаты показали, что наибольшая доля лиц с впервые выявленной миопией среди взрослых была зафиксирована в возрастной группе 18–29 лет. У женщин этот показатель составил 35%, а у мужчин – 59,9% [2]. Это свидетельствует о том, что миопия становится все более распространенной проблемой среди молодежи, что может быть связано с увеличением времени, проводимого за экранами, а также с изменением образа жизни и учебными нагрузками. Важно отметить, что ранняя диагностика и коррекция зрения могут существенно улучшить качество жизни и предотвратить дальнейшее ухудшение состояния. Таким образом, наше исследование подчеркивает необходимость регулярных обследований зрения, особенно для молодежи, чтобы своевременно выявлять и корректировать возможные нарушения.

Современные люди всё больше времени проводят за экранами электронных устройств, что приводит к повышенной нагрузке на зрительный анализатор. Что может вызвать изменения в работе мозга, связанные с восприятием и обработкой информации поступающей афферентной информации, и, как следствие, развитию когнитивных нарушений [2].

Развиваются новые представления о миопии как о заболевании, связанном и с работой головного мозга. Исследования показывают, что миопия высокой степени может быть связана с развитием когнитивных нарушений [19].

Метод когнитивных вызванных потенциалов Р300 может использоваться не только для нейрофизиологического анализа работы мозга, но и для объективной оценки остроты зрения (в характеристиках Р3). Выявление Р3 указывает на выявление когнитивную реакцию на целевые стимулы в парадигме oddball [3].

Показатели латентности и амплитудыР3 могут быть использованы в качестве объективной оценки остроты зрения [3]. В случае использования ВП Р300 через слуховой анализатор в условиях офтальмологически подтверждённой сниженной зрительной функции появляется возможность выявить новые нейрофизиологические компенсаторные возможности мозгапри обработке поступающей слуховой сенсорной информации. Пространственное церебральное распределение параметров слухового когнитивного ВП Р300 у молодых людей с миопией позволит получить новую информацию об обработке поступающей информации и принятии решений у миопов.

Цель – исследовать изменение характеристик когнитивных вызванных потенциалов (ВП) Р300 у молодых людей с миопией, 17–19 лет.

Материалы и методы

96 человек 17–19 лет было привлечено для участия в исследовании (66 девушек и 30 юношей), средний возраст которых составил 18,3±0,1 лет. Выполнялось офтальмологическое обследование всех участников исследования. В данном исследовании 59 человек имели установленный диагноз «миопия», все участники обучались в медицинском университете г. Архангельска

Исследование влияния различных факторов на зрительную функцию у подростков 17-19 лет потребовало тщательного отбора участников. Включены были только лица в указанном возрастном диапазоне, предоставившие добровольное информированное согласие на участие и соответствующие критериям 1 и 2 групп здоровья согласно диспансерному наблюдению. Таким образом, у участников отсутствовали серьезные заболевания, за исключением рефракционных нарушений, которые, и являлись предметом изучения. Важно отметить, что классификация здоровья опиралась на общепринятые стандарты, с указанием конкретных кодов МКБ-10 для каждого класса заболеваний. Критерии исключения были строгими и направлены на минимизацию влияния сопутствующих заболеваний на результаты исследования. Для контроля состояния участников перед исследованием проводился тщательный опрос и, при необходимости, измерение температуры

тела и артериального давления. В ходе обследования проводилась комплексная офтальмологическая диагностика. Определялись некорригированная острота зрения (НКОЗ) – визуальная острота без коррекции, максимально корригированная острота зрения (МКОЗ) – лучшее зрение, достигаемое с помощью очков или контактных линз, и клиническая рефракция (в диоптриях), характеризующая степень рефракционных ошибок (миопия, гиперметропия, астигматизм). Особое внимание уделялось исследованию аккомодации – способности глаза фокусироваться на объектах, находящихся на разном расстоянии, с определением запаса относительной аккомодации (ЗОА в диоптриях), показателя, отражающего эластичность хрусталика и способность глаза к адаптации. Все участники были разделены на две группы: группу офтальмологически здоровых (без заболеваний органа зрения) и группу пациентов с миопической рефракцией (слабой, средней или высокой степени), соответствующей коду МКБ-10 H52.1. Такое разделение позволило сравнить показатели зрительной функции в группах и выявить возможные различия, обусловленные наличием миопии различной степени.

Всем участникам исследования была проведена запись слуховых когнитивных вызванных потенциалов P300 в положении сидя с закрытыми глазами с использованием электроэнцефалографа «НейронСпектр-4/ВПМ» (разработка компании «Нейрософт», Россия).

Частота квантования сигнала ЭЭГ составляла 500 Гц, полоса регистрации – от 0,5 до 35,0 Гц. Сопротивление электродов не превышало 10 кОм.

Испытуемым предъявлялись слуховые стимулы в случайной последовательности. Среди них были как частые (незначимые), так и редкие (значимые). При появлении значимого стимула испытуемый должен был нажать на кнопку.

Условия стимуляции были бинауральными. Длительность стимула составляла 50 мс, интенсивность – 80 дБ. Период между стимулами – 1 с, частота тона – 2000 Гц (значимый стимул) и 1000 Гц (незначимый стимул).

Вероятность предъявления значимого стимула составляла 30% от общего количества стимулов. Число усреднений для значимых стимулов достигало 25. Сигналы, превышающие амплитуду 100 мкВ, исключались. Оценивались латентность компонента P2 (в миллисекундах), амплитуда P2-N2 (от пика до пика в микровольтах), латентность компонента P3 (в миллисекундах), амплитуда пика компонента P3 (до изолинии в микровольтах), амплитуда N2-P3 (от пика до пика в микровольтах) в электроэнцефалографических отведениях согласно международной схеме «10–20»[18]. Рассчитывали наличие передне-заднего градиента распре-

деления амплитуд изучаемых компонентов между лобными, теменными, центральными и височными с одной стороны и затылочными отделами с другой стороны, слева (Fp1-O1, F3-O1, C3-O1, P3-O1, T3-O1, T6-O1) и справа (Fp2-O2, F4-O2, C4-O2, P4-O2, T4-O2, T6-O2). При статистически значимой разнице значений амплитуд в передних и затылочных областях ($p<0,05$) считали данный градиент выраженным, при отсутствии статистической значимости различий ($p>0,05$) – градиент считали сглаженным.

Оценка результатов исследования показала, что распределение признака не соответствует нормальному. Для сравнения показателей в разных группах использовали критерии Манна–Уитни и Вальда–Вольфовица. Для описания признаков использовали медиану (Me) и интерквартильный размах от первого (Q1) до третьего (Q3) квартиля. Критический уровень значимости (p) при проверке статистических гипотез в исследовании был установлен на уровне 0,05.Статистическую обработку данных проводили с помощью специального программного обеспечения.Исследование проводилось в соответствии со всеми требованиями Хельсинкской декларации. Все участники дали добровольное письменное согласие на участие в исследовании. Исследование получило одобрение локального этического комитета, зафиксированное в протоколе № 06/09-23 от 27.09.2023.

Результаты

В ходе проведенного исследования было обследовано 96 участников, 192 глаза. В 38,5% случаев 74 глаза не было выявлено патологии органа зрения. Наличие миопической рефракции было выявлено в 61,5% случаев – 118 глаз, в среднем, в данной группе рефракция обследованных участников составила: -2,27 ±0,13 диоптрий.

Разделение участников по степеням близорукости представлено в таблице 1.

Таблица 1.

Гендерное разделение лиц, принявших участие в исследовании органа зрения по видам близорукости (абс. числ, %)

R.N.	Без офтальмо-патологии, абс., %	Миопия слабой степени абс., %	Миопия средней степени абс., %	Миопия высокой степени абс., %
Мужской	33 (17,2%)	21 (11,0%)	4 (2,1%)	2 (1,0%)
Женский	41 (21,3%)	59 (30,7%)	29 (15,1%)	3 (1,6%)
Всего	74 (38,5%)	80 (41,7%)	33 (17,2%)	5 (2,6%)

Как видно из таблицы 1 в большинстве случаев были выявлены миопия слабой, средней степени, 41,7% и 17,2% соответственно. При обследовании случайной выборки отсутствие патологии органа зрения было выявлено в 38,5% случаев.

Таблица 2.

Показатели остроты зрения вдаль и аккомодации у молодых лиц в возрасте 17–19 лет (Me (25;75)).

Показатели	Без офтальмопатологии n=74	Миопия			*P*
		Слабой степени n=80	Средней степени n=33	Высокой степени n=5	
Некорригированная острота зрения вдаль, усл. ед. по таблице Сивцева-Головина	1,0 (1,0; 1,0)	0,2 (0,1;0,5)	0,09 (0,05; 0,1)	0,06(0,06; 0,08)	$p<0,001$
Максимально корригированная острота зрения вдаль, усл. ед. по таблице Сивцева-Головина	–	1,0 (1,0; 1,0)	1,0 (0,9; 1,0)	0,9 (0,9; 1,0)	0,068
Положительная часть объема аккомодации, дптр	-4,43(-5,0; -4,0)	-3,67 (-5,0; -2,5)	-3,58 (-5,0; -3,0)	-3,31 (-4,0; -2,0)	$p<0,001$

Согласно данным, представленным в таблице 2, установлено статистически значимое снижение некорригированной остроты зрения как по сравнению с группой без офтальмологических нарушений, так и при сравнении групп участников исследования с миопической рефракцией в зависимости от степени близорукости.

Участники без офтальмологических патологий продемонстрировали некорригированную остроту зрения, равную 1,0 усл. ед. Участников с миопией слабой степени (-0,5 до -3,0 диоптрий) – 0,2 усл. ед., средней степени (-3,25 до -6,0 диоптрий) – 0,09 усл. ед., высокой степени (свыше -6,25 диоптрий) – 0,06 усл. ед.

Для оценки функции аккомодации на практике используется показатель запаса относительной аккомодации (положительная часть объема аккомодации). По данным таблицы 2, отмечено снижение положительной части объема аккомодации. При отсутствии офтальмологических патологий этот показатель составил -4,43 диоптрии.

Сравнение групп участников с различной степенью близорукости выявило снижение данного показателя: при слабой степени миопии – -3,67

диоптрий, средней степени – -3,58 диоптрий, высокой степени – -3,31 диоптрий. Выявленные различия статистически значимы ($p<0,001$).

В исследовании принимали участие 30 мужчин и 66 женщин. Средний возраст участников составил 18,3±0,1 лет, в группе здоровых участников было 37 человека, в группе миопов 59 человек.

Так как достоверных различий по полу выявлено не было, все участники исследования при анализе ВП Р300 были разделены на две группы: лица без офтальмопатологии и лица с миопией.

Результаты исследования слуховых когнитивных вызванных потенциалов Р300 распределились следующим образом. У миопов в сравнении с группой офтальмологически здоровых людей статистически значимо показано, что в отведениях F3 и P4 фиксируется более удлинённая латентность пика Р3. Статистически значимое различие в амплитудах пика Р3 фиксируется в отведениях F3 и Cz, где амплитуда пика Р3 у миопов превышает амплитуду пика Р3 у людей с нормой зрения. В таблице 3 представлены параметры пика Р3 слухового когнитивного вызванного потенциала Р300.

Таблица 3.

Параметры латентности и амплитуды пика компонента Р3 ВП Р300 у молодых людей 17–19 лет с нормальным зрением и миопией, Me (Q1; Q3)

Параметр	Группа лиц без офтальмопатологии (n=37)	Группа лиц с миопией (n=59)	*P*
Латентность, мс			
F3	309,5 (293,8; 325,8)	314,3 (303,8; 328,0)	**0,041**
F4	307,4 (299,3; 329,1)	314,0 (299,0; 326,7)	0,380
C3	307,6 (293,0; 320,7)	312,4 (300,0; 324,1)	0,155
C4	306,9 (293,0; 322,7)	309,0 (295,0; 326,7)	0,573
P3	302,9 (291,6; 321,3)	309, 0 (293,0;320,0)	0,690
P4	304,9 (290,5; 321,4)	308,1 (291,1; 321,4)	**0,010**
F7	308,3 (295,9; 328,8)	313,4 (302,8; 327,3)	0.309
F8	308,0 (296,5; 321,9)	312,1 (297,5; 326,7)	0.302
T3	310,4 (296,5; 323,4)	310, 0 (302,0; 325,0)	0.613
T4	308,5 (298,2; 321,8)	312,1 (294,0; 324,2)	0.845
T5	308,5 (291,8;321,8)	309,0 (300,2; 325,1)	0,599
T6	306,0 (293,1; 321,1)	303,8 (291,1; 322,7)	0,969
Fz	312,2 (300,0; 324,8)	314,0 (296,2; 326,0)	0.997
Cz	300,9 (290,3; 320,9)	307,0 (296,0; 321,4)	0,355
Pz	303,5 (292,6; 321,3)	306,0 (290,0; 320,1)	0,866
O1	298,2 (287,2; 317,6)	306,0 (290,9; 318,8)	0,369

O2	303,3 (292,0; 318,8)	304,0 (291,1; 324,1)	0,815
Амплитуда, мкВ			
F3	6,1 (2,3; 10,2)	7,6 (4,7; 12,1)	**0.037**
F4	7,1 (3,4; 11,3)	8,8 (4,5; 11,9)	0.079
C3	7,5 (4,1; 12,2)	9,7 (6,0; 12,3)	0.085
C4	7,7 (4,3; 12,1)	9,8 (6,3; 13,9)	0.061
P3	8,5 (5,6; 13,1)	9,5 (7,5; 13,6)	0.248
P4	8,3 (5,9; 13,3)	9,5 (7,7; 14,4)	0.101
F7	5,7 (2,9; 8,7)	5,7 (3,4; 10,4)	0.211
F8	7,2 (3,6; 9,4)	7,5 (3,9; 10,9)	0.202
T3	6,5 (3,9; 10,1)	6,9 (3,8; 12,1)	0.250
T4	7,5 (3,7; 10,3)	8,3 (5,1; 11,9)	0.275
T5	5,8 (3,3; 10,5)	7,2 (4,3; 10,7)	0.171
T6	7,2 (4,5; 11,8)	8,6 (5,5; 12,3)	0.224
Fz	6,3 (2,4; 11,1)	8,5 (4,3; 14,5)	0.072
Cz	7,7 (3,6; 12,6)	9,4 (6,4; 12,6)	**0.039**
Pz	9,3 (5,5; 12,5)	9,9 (7,4; 15,2)	0.086
O1	9,1(6,0; 12,1)	8,7 (6,6; 13,0)	0.505
O2	9,1 (5,9; 11,7)	8,9 (5,7;13,3)	0.395

В таблице 4 представлены параметры амплитуды компонента N2-P3. У миоповамплитуда N2-P3 в затылочных отделах головного мозга выше, чем у здоровых участников исследования, значимо выше справа (p=0,039).

Таблица 4.

Параметры амплитуды N2-P3 у молодых людей 17–19 лет у лиц без патологии органа зрения и миопией, мкВ, Me (Q1; Q3)

Параметр	Группа лиц без офтальмопатологии (n=37)	Группа лиц с миопией (n=59)	*P*
F3	10,448 (7,434; 17,018)	12,533 (9,810;17,493)	0,322
F4	12,853 (7,459; 17,481)	12,247 (8,550;17,291)	0,322
C3	9,980 (6,651; 16,777)	11,992 (8,679;16,037)	0,897
C4	10,999 (6,417; 6,314)	11,153 (9,282;17,145)	0,931
P3	9,191 (5,805; 14,320)	10,466 (7,540;13,940)	0,897
P4	10,605 (6,845; 12,973)	10,856 (7,757;15,239)	0,576
F7	9,344 (7,253; 12,756)	11,218 (6,086;15,072)	0,155
F8	9,267 (6,864; 14,484)	10,032 (6,971;14,995)	0,438
T3	8,974 (6,454; 12,991)	9,743 (6,344; 13,874)	0,763
T4	9,886 (6,028; 16,366)	9,840 (7,442; 14,439)	0,102

T5	7,900 (5,435; 10,639)	8,106 (6,276; 11,886)	0,438
T6	9,093 (6,410; 13,525)	9,006 (6,722; 12,231)	0,322
Fz	13,936 (7,676; 17,383)	13,018 (8,953;19,329)	0,576
Cz	10,585 (5,665; 17,662)	12,078 (7,988;17,196)	0,064
Pz	10,605 (6,845; 12,973)	10,856 (7,757;15,239)	0,952
O1	7,957 (4,974; 10,481)	9,740 (5,791; 12,508)	0,322
O2	8,765 (5,246; 12,008)	9,149 (6,292; 12,357)	**0,039**

Передне-заднее распределение амплитуд компонентов ВП Р300 при обработке слуховой информации отражает традиционно более высокую амплитуду данных компонентов в передних областях головного мозга, в том время как в области обработки зрительной информации (затылочные отделы мозга) данная амплитуда значительно меньше выражена.

Как в группе людей с миопией, так и в группе людей без офтальмопатологии передне-задние градиенты амплитуд N2-P3 распределялись следующим образом: по сравнению с затылочными отделами головного мозга,амплитуда компонента N2-P3 была закономерно статистически значимо выше в передних отделах головного мозга. Так, в группе здоровых людей (без офтальмопатологии), статистически значимо различаются градиенты F3-O1 (p=0,012), F4-O2 (p=0,005), C4-O2 (p=0,048); в группе людей с миопической рефракцией статистически значимая разница фиксируется в отведениях F3-O1 (p=0,001), F4-O2 (p=0,001), C3-O1 (p=0,005), C4-O2 (p=0,004).

В группах не выявлено статистически значимых различий латентностей компонента P2 (p>0,05). Однако распределение передне-задних градиентов амплитуд данного компонента (P2-N2) по конвекситальной поверхности было различным в каждой группе (группе миопов и группе лиц с нормальным зрением). У лиц с миопической рефракцией в задневисочных областях (отведения T5 и T6) амплитуда P2-N2 была статистически значимо выше (p<0,05), чем в затылочных областях (отведения O1 и O2), медианы в отведениях T5 и T6 составили 5,0 мкВ и 5,6 мкВ соответственно, а в затылочных – 3,4 мкВ и 3,8 мкВ соответственно. Передне-задний градиент амплитуд компонента P2-N2 у миопов был сглажен, т.е. амплитуды компонента P2-N2 в лобных, теменных и затылочных областях мозга были статистически одинаковыми (p>0,05). У здоровых участников передне-задний градиент амплитуд P2-N2 был более отчетливым, т.е. амплитуды P2-N2 были закономерно больше в лобных отделах по сравнению с затылочными отделами мозга, особенно справа (7,2 мкВ и 5,2 мкВ

соответственно в Fp1 и O1 отделах; 7,9 мкВ и 5,2 мкВ соответственно в F4 и O2 отделах, $p<0,05$).

Обсуждение результатов

Анализ описанных выше результатов исследования выявил, что у лиц 17-19 лет с миопической рефракцией увеличена амплитуда пика P3 в левых лобных и центральных отделах головного мозга; увеличены параметры латентности компонента P3 в левых лобных отделах и париетальных областях головного мозга; увеличена амплитуда N2-P3 в проекции зрительной коры, а также сглажен передне-задний градиент амплитуд P2-N2.

Таким образом, у миопов данной возрастной группы при распознавании значимого слухового стимула в большей степени вовлекаются нейрональные ресурсы зрительной и задне-височной коры головного мозга, преимущественно справа.

В нашем предыдущем исследовании с использованием аналогичной методики нами были показаны изменения параметров P300 у молодых людей с миопией более старшей возрастной группы, 21–23 лет [3].

Анализируя изменения слуховых когнитивных ВП P300 в группах миопов 17–19 и 21–23 лет можно предположить, что в целом формирование миопии сопряжено с удлинением времени обработки информации и более выраженным вовлечением нейрональных ресурсов для обработки когнитивной информации. Это связано с напряжением механизмов нейропластичности и вовлечением более широкого представительства корковых областей в обработку слуховой информации, включая область зрительной коры и задне-височных областей, в условиях относительного снижения вклада зрительной афферентной информации.

Тем не менее, есть различия нейрофизиологических коррелятов анализа и обработки информации в этих возрастных группах. Это может быть связано со стажем формирования миопической рефракции, когда фиксируются аномальное церебральное зрение [1; 16], а зрелость корковых структур различна в группах 17–19 и 21–23 лет различна.

В группе 17-19 лет, в отличие от группы 21-23 лет, изменяются и более ранние компоненты ВП P300 (P2 и N2), связанные с процессами восприятия, обработки и анализа поступающей афферентной информации, что говорит о вовлечении большего количества нейронов участвующих в обработке поступающей информации, большей напряженности коры головного мозга и задействованности большего количества нейрональных ресурсов у миопов, по сравнению с контрольной группой того же возраста. В группе людей с ми-

опией 17–19 лет, также как и группе миопов 21-23 лет, удлиняется время обработки слуховой информации и изменяется механизм нейронной регуляции восприятия и обработки поступающей афферентной информации на церебральном уровне, так как зрительная кора принимает участие в окончательном формировании зрительного образа. В то же время, напряжение структур головного мозга и вовлеченность большего количества мозговых ресурсов в обработку поступающей зрительной информации у группы миопов более младшего возраста, вероятно, связано с психофизиологическими факторами и социальным периодом, в котором они в данный момент находятся.

Возраст 17–19 лет ознаменуется для молодых людей новым социальным этапом и связан с поступлением в ВУЗ и большим числом социальных стресс-факторов, с которыми сталкивается молодой человек. Смена социального окружения и места жительства, переезд в другой город, изменение рациона питания и привычных продуктов, нерегулярная физическая нагрузка и, наконец, поступление в высшее учебное заведение, высокий уровень учебных требований – все это приводит молодого человека 17–19 лет в состояние серьезного психоэмоционального напряжения [4; 7].

Повсеместный переход на цифровые технологии обучения и высокая когнитивная нагрузка, особенно в медицинском ВУЗе, предъявляют высокие требования к пластичности мозга у студентов. Как показали наши исследования, у студентов с миопической рефракцией усложнены процессы восприятия и обработки поступающей афферентной информации, относительно групп контроля того же возраста. Высокая нагрузка на зрительный анализатор, адаптивные процессы, связанные с цифровизацией образовательного процесса и новой социализацией в вузе требуют максимального включения процессов нейропластичности, а также могут формировать предпосылки для когнитивных дисфункций, в том числе на фоне прогрессирования миопии.

Близорукость высокой степени является основной причиной слепоты во всем мире [15]. Это фактор риска многих тяжелых глазных осложнений, включая дегенерацию желтого пятна, катаракту и нейропатию зрительного нерва [8]. Таким образом, для людей с миопией нарастающий процесс цифровизации в сочетании с высокой когнитивной нагрузкой, может негативно сказываться на когнитивных функциях в частности и на мозговой деятельности в целом [3].

Заключение

У миопов 17–19 лет выявлено удлинение времени принятия решения с вовлечением большего объема нейрональных ресурсов, в том числе ресурсов зрительной и задне-височной коры головного мозга, при восприятии

и распознавании значимой слуховой информации, в сравнении с офтальмологически здоровыми лицами.

Представленные данные нейрофизиологических коррелятов обработки информации можно рассматривать в рамках физиологической адаптации корковых центров обработки когнитивной информации у лиц с миопией, так как не было выявлено задержки времени обработки информации, выходящей за рамки возрастных нормативов. Однако удлинение времени восприятия, распознавания слуховой информации и особенно времени принятия решения на фоне выраженного сглаживания передне-лобного градиента амплитуды компонентов ВП Р300 можно рассматривать как потенциальные нейромаркеры когнитивных нарушений на фоне прогрессирующей миопии. Учитывая, что значимый вклад в развитие таких нейрофизиологических изменений могут вносить психоэмоциональные нарушения, то вышеобозначенные особенности распределения компонент ВП Р300 у миопов могут быть также нейромаркерами, отражающими необходимость углубленной нейропсихологической диагностики и последующей нейрокоррекции для повышения адаптационных возможностей мозга и успешного выполнения образовательных задач у молодых лиц.

Информация о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация о спонсорстве. Исследование выполнено с использованием средств гранта Российского научного фонда № 23-75-01072, https://rscf.ru/project/23-75-01072/.

Список литературы

1. Дутчин, И. В., и др. (2022). Изучение психоэмоционального статуса у пациентов, планирующихся на выполнение кераторефракционных операций по методике SMILE. *Офтальмохирургия*, (3), 20–27. https://doi.org/10.25276/0235-4160-2022-3-20-27. EDN: https://elibrary.ru/AZYWUL
2. Зеленцов, Р. Н., Унгуряну, Т. Н., & Поскотинова, Л. В. (2022). Возрастные аспекты заболеваемости миопией на европейском севере России. *Экология человека*, (1), 19–26. https://doi.org/10.17816/humeco84128. EDN: https://elibrary.ru/IHPCKF
3. Зеленцов, Р. Н., Поскотинова, Л. В., & Кожевникова, И. С. (2023). Особенности пространственного распределения параметров слуховых когнитивных вызванных потенциалов Р300 у молодых людей с миопией. *Экология*

человека, *30*(11), 865–874. https://doi.org/10.17816/humeco626008. EDN: https://elibrary.ru/YHKMDV

4. Тарутта, Е. П., и др. (2018). Комплексный подход к профилактике и лечению прогрессирующей миопии у школьников. *РМЖ. Клиническая офтальмология*, *18*(2), 70–76. https://doi.org/10.21689/2311-7729-2018-18-2-70-76. EDN: https://elibrary.ru/OTMVBH
5. Braverman, R. (2007). Diagnosis and treatment of refractive errors in the pediatric population. *Current Opinion in Ophthalmology*, *18*(5), 379–383. https://doi.org/10.1097/ICU.0b013e328244dfed
6. Dayan, Y. B., et al. (2005). The changing prevalence of myopia in young adults: a 13-year series of population-based prevalence surveys. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, *46*(8), 2760–2765. https://doi.org/10.1167/iovs.04-0260
7. Fan, D. S. P., et al. (2004). Prevalence, incidence, and progression of myopia of school children in Hong Kong. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, *45*(4), 1071–1075. https://doi.org/10.1167/iovs.03-1151
8. Hayashi, K., et al. (2010). Long-term pattern of progression of myopic maculopathy: a natural history study. *Ophthalmology*, *117*(8), 1595–1611. https://doi.org/10.1016/j.ophtha.2009.11.003
9. Holden, B. A., et al. (2016). Global prevalence of myopia and high myopia and temporal trends from 2000 through 2050. *Ophthalmology*, *123*(5), 1036–1042. https://doi.org/10.1016/j.ophtha.2016.01.006
10. Ikuno, Y. (2017). Overview of the complications of high myopia. *Retina*, *37*(12), 2347–2351.
11. Li, Q., et al. (2020). Investigation of the psychological health of first-year high school students with myopia in Guangzhou. *Brain and Behavior*, *10*(4), e01594. https://doi.org/10.1002/brb3.1594. EDN: https://elibrary.ru/FXKKNQ
12. McCarty, C. A., & Taylor, H. R. (2000). Myopia and vision 2020. *American Journal of Ophthalmology*, *129*(4), 525–527.
13. Nitzan, I., Shmueli, O., & Safir, M. (2024). Association of myopia with anxiety and mood disorders in adolescents. *Eye*, 1–3. https://doi.org/10.1038/s41433-024-03170-6. EDN: https://elibrary.ru/FVHVXZ
14. Qiu, M., et al. (2013). Association between myopia and glaucoma in the United States population. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, *54*(1), 830–835. https://doi.org/10.1167/iovs.12-11158
15. Ruiz-Medrano, J., et al. (2019). Myopic maculopathy: current status and proposal for a new classification and grading system (ATN). *Progress in Retinal and Eye Research*, *69*, 80–115. https://doi.org/10.1016/j.preteyeres.2018.10.005. EDN: https://elibrary.ru/TPBWAV

16. Vitale, S., Sperduto, R. D., & Ferris, F. L. (2009). Increased prevalence of myopia in the United States between 1971–1972 and 1999–2004. *Archives of Ophthalmology*, *127*(12), 1632–1639. https://doi.org/10.1001/archophthalmol.2009.303
17. Wang, T. J., et al. (2009). Changes of the ocular refraction among freshmen in National Taiwan University between 1988 and 2005. *Eye*, *23*(5), 1168–1169. https://doi.org/10.1167/iovs.03-1151
18. World Health Organization. Retrieved from: http://www.who.int/blindness/causes/priority/en/index4.html
19. Wu, P. C., et al. (2018). Myopia prevention and outdoor light intensity in a school-based cluster randomized trial. *Ophthalmology*, *125*(8), 1239–1250. https://doi.org/10.1016/j.ophtha.2017.12.011
20. Zhu, X., et al. (2023). CCL2-mediated inflammatory pathogenesis underlies high myopia-related anxiety. *Cell Discovery*, *9*(1), 94. https://doi.org/10.1038/s41421-023-00588-2. EDN: https://elibrary.ru/MMQJUM
21. Zhu, X., et al. (2021). Aberrant TGF-β1 signaling activation by MAF underlies pathological lens growth in high myopia. *Nature Communications*, *12*(1), 2102. https://doi.org/10.1038/s41467-021-22041-2. EDN: https://elibrary.ru/XAAUMZ

References

1. Dutchin, I. V., et al. (2022). Study of the psycho-emotional status in patients scheduled for keratorefractive surgery using the SMILE technique. *Ophthalmosurgery*, *(3)*, 20–27. https://doi.org/10.25276/0235-4160-2022-3-20-27. EDN: https://elibrary.ru/AZYWUL
2. Zelentsov, R. N., Unguryanu, T. N., & Poskotinova, L. V. (2022). Age-related aspects of myopia incidence in the European North of Russia. *Human Ecology*, *(1)*, 19–26. https://doi.org/10.17816/humeco84128. EDN: https://elibrary.ru/IHPCKF
3. Zelentsov, R. N., Poskotinova, L. V., & Kozhevnikova, I. S. (2023). Features of the spatial distribution of auditory cognitive evoked potentials P300 parameters in young people with myopia. *Human Ecology*, *30*(11), 865–874. https://doi.org/10.17816/humeco626008. EDN: https://elibrary.ru/YHKMDV
4. Tarutta, E. P., et al. (2018). A comprehensive approach to the prevention and treatment of progressive myopia in schoolchildren. *RMJ. Clinical Ophthalmology*, *18*(2), 70–76. https://doi.org/10.21689/2311-7729-2018-18-2-70-76. EDN: https://elibrary.ru/OTMVBH
5. Braverman, R. (2007). Diagnosis and treatment of refractive errors in the pediatric population. *Current Opinion in Ophthalmology*, *18*(5), 379–383. https://doi.org/10.1097/ICU.0b013e328244dfed

6. Dayan, Y. B., et al. (2005). The changing prevalence of myopia in young adults: a 13-year series of population-based prevalence surveys. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, *46*(8), 2760–2765. https://doi.org/10.1167/iovs.04-0260
7. Fan, D. S. P., et al. (2004). Prevalence, incidence, and progression of myopia of school children in Hong Kong. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, *45*(4), 1071–1075. https://doi.org/10.1167/iovs.03-1151
8. Hayashi, K., et al. (2010). Long-term pattern of progression of myopic maculopathy: a natural history study. *Ophthalmology*, *117*(8), 1595–1611. https://doi.org/10.1016/j.ophtha.2009.11.003
9. Holden, B. A., et al. (2016). Global prevalence of myopia and high myopia and temporal trends from 2000 through 2050. *Ophthalmology*, *123*(5), 1036–1042. https://doi.org/10.1016/j.ophtha.2016.01.006
10. Ikuno, Y. (2017). Overview of the complications of high myopia. *Retina*, *37*(12), 2347–2351.
11. Li, Q., et al. (2020). Investigation of the psychological health of first-year high school students with myopia in Guangzhou. *Brain and Behavior*, *10*(4), e01594. https://doi.org/10.1002/brb3.1594. EDN: https://elibrary.ru/FXKKNQ
12. McCarty, C. A., & Taylor, H. R. (2000). Myopia and vision 2020. *American Journal of Ophthalmology*, *129*(4), 525–527.
13. Nitzan, I., Shmueli, O., & Safir, M. (2024). Association of myopia with anxiety and mood disorders in adolescents. *Eye*, 1–3. https://doi.org/10.1038/s41433-024-03170-6. EDN: https://elibrary.ru/FVHVXZ
14. Qiu, M., et al. (2013). Association between myopia and glaucoma in the United States population. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, *54*(1), 830–835. https://doi.org/10.1167/iovs.12-11158
15. Ruiz-Medrano, J., et al. (2019). Myopic maculopathy: current status and proposal for a new classification and grading system (ATN). *Progress in Retinal and Eye Research*, *69*, 80–115. https://doi.org/10.1016/j.preteyeres.2018.10.005. EDN: https://elibrary.ru/TPBWAV
16. Vitale, S., Sperduto, R. D., & Ferris, F. L. (2009). Increased prevalence of myopia in the United States between 1971–1972 and 1999–2004. *Archives of Ophthalmology*, *127*(12), 1632–1639. https://doi.org/10.1001/archophthalmol.2009.303
17. Wang, T. J., et al. (2009). Changes of the ocular refraction among freshmen in National Taiwan University between 1988 and 2005. *Eye*, *23*(5), 1168–1169. https://doi.org/10.1167/iovs.03-1151
18. World Health Organization. Retrieved from: http://www.who.int/blindness/causes/priority/en/index4.html

19. Wu, P. C., et al. (2018). Myopia prevention and outdoor light intensity in a school-based cluster randomized trial. *Ophthalmology*, *125*(8), 1239–1250. https://doi.org/10.1016/j.ophtha.2017.12.011
20. Zhu, X., et al. (2023). CCL2-mediated inflammatory pathogenesis underlies high myopia-related anxiety. *Cell Discovery*, *9*(1), 94. https://doi.org/10.1038/s41421-023-00588-2. EDN: https://elibrary.ru/MMQJUM
21. Zhu, X., et al. (2021). Aberrant TGF-β1 signaling activation by MAF underlies pathological lens growth in high myopia. *Nature Communications*, *12*(1), 2102. https://doi.org/10.1038/s41467-021-22041-2. EDN: https://elibrary.ru/XAAUMZ

ВКЛАД АВТОРОВ

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку статьи для публикации.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

The authors contributed equally to this article.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Зеленцов Роман Николаевич, к.м.н., доцент кафедры семейной медицины и внутренних болезней
ФГБОУ ВО Северный государственный медицинский университет Минздрава России
пр. Троицкий, 51, г. Архангельск, 163000, Российская Федерация
zelentsovrn@gmail.com

Кожевникова Ирина Сергеевна, к.б.н., доцент кафедры биологии человека и биотехнических систем; доцент кафедры гигиены и медицинской экологии
ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова»; ФГБОУ ВО Северный государственный медицинский университет Минздрава России
Набережная Северной Двины, 17, г. Архангельск, 163002, Российская Федерация; пр. Троицкий, 51, г. Архангельск, 163000, Российская Федерация
kogevnikovais@yandex.ru

Поскотинова Лилия Владимировна, д.б.н., к.м.н., доцент, главный научный сотрудник, заведующая лабораторией биоритмологии Института физиологии природных адаптаций

Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лаверова Уральского отделения Российской академии наук; ФГБОУ ВО Северный государственный медицинский университет Минздрава России
пр. Никольский, 20, г. Архангельск, 163020, Российская Федерация; пр. Троицкий, 51, г. Архангельск, 163000, Российская Федерация
liliya200572@mail.ru

DATA ABOUT THE AUTHORS

Roman N. Zelentsov, Cand. Sc. (Med), Associate Professor of the Department of Family Medicine and Internal Diseases
Northern State Medical University
51, Troitsky Ave., Arkhangelsk, 163000, Russian Federation
zelentsovrn@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4875-0535

Irina S. Kozhevnikova, Ph.D., Associate Professor of the Department of Human Biology and Biotechnical Systems; Associate Professor of the Department of Hygiene and Medical Ecology
Northern (Arctic) Federal University; Northern State Medical University
17, Severnaya Dvina Embankment, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; 51, Troitsky Ave., Arkhangelsk, 163000, Russian Federation
kogevnikovais@yandex.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7194-9465

Liliya V. Poskotinova, Dr.Sc. (Biol.), Cand. Sc. (Med.), Associated Professor, Chief Scientific Reserecher, Head of the Biorhythmology Laboratory, Institute of Environmental Physiology
N.P. Laverov Federal Research Center for Integrated Arctic Studies, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; Northern State Medical University
20, Nikolsky Ave., Arkhangelsk, 163020, Russian Federation; 51, Troitsky Ave., Arkhangelsk, 163000, Russian Federation
liliya200572@mail.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7537-0837

Поступила 29.11.2024
После рецензирования 15.12.2024
Принята 13.02.2025

Received 29.11.2024
Revised 15.12.2024
Accepted 13.02.2025

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-4-1495 **EDN: PBNMSK**
УДК 616-084+159.99

CC BY NC ND

Научная статья

ФАКТОРЫ РИСКА И СОСТОЯНИЕ ЗДОРОВЬЯ СОТРУДНИКОВ УГОЛОВНО-ИСПОЛНИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ: ПОДХОДЫ К ДОКЛИНИЧЕСКОМУ ИССЛЕДОВАНИЮ НА ОСНОВЕ САМООЦЕНКИ

П.А. Кисляков, Н.А. Цветкова

Аннотация

Обоснование. Служебная деятельность сотрудников отечественной уголовно-исполнительной системы сопряжена с большим количеством профессиональных рисков, выступающих потенциальными источниками эмоционально-психического выгорания, оказывающих косвенное негативное влияние на состояние их здоровья как на рабочем месте, так и вне его. Данное обстоятельство обуславливает необходимость своевременного выявления у сотрудников этой системы имеющихся проблем со здоровьем и признаков нервно-психического истощения, обостряет потребность в их непрерывном доклиническом (психологическом) мониторинге.

Цель – изучение факторов риска (нарушение сна, употребление ПАВ, психоэмоциональное истощение) и состояния здоровья сотрудников уголовно-исполнительной системы на основе их самооценок во взаимосвязи с профессиональной жизнестойкостью и профессиональным выгоранием.

Методы. Исследование проводилось в 2024 году в Ивановской области среди сотрудников уголовно-исполнительной системы. В исследовании приняло участие 34 человека мужского пола в возрасте от 23 до 49 лет (M=23,5 года). Методики: Профессиональная жизнестойкость (OHQ) (Морено-Джименез с соавт., русскоязычная версия Е.А. Шмелевой, П.А. Кислякова); Опросник профессионального выгорания (MBI) (К. Маслач, русскоязычная версия Н.Е. Водопьяновой); Шкала субъективного благополучия (А. Бадо и Г.А. Мендельсон, русскоязычная версия М.В. Соколовой); Опросник совладания со стрессом (COPE) (К. Карвер, М. Шейер, Дж. Вейнтрауб, русскоязычная экспресс-версия Е.В. Куфтяк, В.И. Кисициной).

Результаты. Обобщены подходы к диагностике факторов риска и состояния здоровья сотрудников уголовно-исполнительной системы. Около 17% испытуемых продемонстрировали средние и ниже среднего значения самооценки своего здоровья. Около 70% испытуемых имеют средние и ниже средних значения оценок признаков, сопровождающих негативную психоэмоциональную симптоматику; около 67% испытуемых продемонстрировали признаки профессионального выгорания разной степени. Установлена прямая тесная связь между самооценками сотрудников факторов нарушения здоровья и наличного состояния их здоровья, показателями профессионального выгорания и профессиональной жизнестойкости.

Заключение. Выявление и своевременная профилактика факторов риска нарушения здоровья сотрудников уголовно-исполнительной системы имеет решающее значение в плане повышения эффективности их служебной деятельности, эффективности функционирования коллективов каждого из учреждений этой системы, а в конечном итоге – ее социальной эффективности. Для этой цели может быть использована идея непрерывного мониторинга проблем со здоровьем у сотрудников УИС, осуществляемого на основе их самооценок.

Ключевые слова: сотрудники уголовно-исполнительной системы; факторы риска нарушения здоровья; профессиональное выгорание; профессиональная жизнестойкость; самооценка состояния здоровья; доклиническое исследование

Для цитирования. Кисляков, П. А., & Цветкова, Н. А. (2025). Факторы риска и состояние здоровья сотрудников уголовно-исполнительной системы: подходы к доклиническому исследованию на основе самооценки. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(4), 501-523. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-4-1495

Original article

RISK FACTORS AND HEALTH STATUS OF CORRECTIONAL OFFICERS: SELF-ASSESSMENT APPROACHES TO PRECLINICAL RESEARCH

P.A. Kislyakov, N.A. Tsvetkova

Abstract

Background. The professional activities of employees of the penitentiary system are associated with a large number of psychosocial risks, which are potential sources of professional burnout and have an indirect negative impact on health both

in and out of the workplace. This circumstance necessitates the timely identification of employees with health problems or signs of emotional exhaustion in the system of continuous preclinical (psychological) monitoring of health and its indicators.

Purpose – the study of risk factors (sleep disorders, substance use, psycho-emotional exhaustion) and the health status of correctional officers based on self-assessment in relation to professional hardiness and burnout.

Methods. The study was conducted in 2024 in the Ivanovo region among correctional officers. The study involved 34 men aged 23 to 49 years (M=23.5 years). Methods: Occupational Hardiness Questionnaire – OHQ (B. Moreno-Jimnez et al., Russian version by E.A. Shmeleva, P.A. Kislyakov), Maslach Burnout Inventory – MBI (C. Maslach, Russian version by N.E. Vodopyanova), Scale of Subjective Well-being (A. Perrudet-Badoux, G. Mendelsohn, Russian version by M.V. Sokolova), Coping Orientation to Problems Experienced Inventory – COPE (C. Carver, M. Scheier, J. Weintraub, Russian version by E.V. Kuftyak, V.I. Kislitsina).

Results. The approaches to the diagnosis of risk factors and the health status of correctional officers are summarized. About 17% of correctional officers demonstrated average and below average values of self-assessment of their health. About 70% of correctional officers have average and below average values of the ratings of signs accompanying negative psycho-emotional symptoms; about 67% of correctional officers showed signs of professional burnout of varying degrees. A direct close relationship has been established between employees' self-assessments of health impairments and their current state of health, indicators of professional burnout and professional resilience.

Conclusion. The identification and timely prevention of health risk factors for employees of the penal correction system is crucial in terms of improving the effectiveness of their professional activities, the effectiveness of the functioning of the teams of each of the institutions of this system, and ultimately its social effectiveness. For this purpose, the idea of continuous monitoring of health problems among medical personnel, carried out on the basis of their self-assessments, can be used.

Keywords: correctional officers; risk factors for health disorders; professional burnout; professional resilience; self-assessment of health status; preclinical research

For citation. Kislyakov, P. A., Tsvetkova, N. A. (2025). Risk factors and health status of correctional officers: Self-assessment approaches to preclinical research. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(4), 501-523. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-4-1495

Введение

За последние несколько десятилетий наблюдается рост нервно-психического выгорания среди различных профессиональных групп, что стало

предметом обеспокоенности государственных структур и общественности. Психосоциальные риски рассматриваются как потенциальные источники профессионального стресса, негативно влияющего на здоровье людей на рабочем месте и вне его. Они также могут способствовать профессиональному выгоранию (Burnout), которое включено Всемирной организацией здравоохранения в нозологию одиннадцатой Международной классификацией болезней (код QD85).

Хотя синдром выгорания наблюдается во всех профессиях, он более распространен у специалистов социономического типа, таких как сотрудники общественной безопасности, врачи и учителя [10]. Как особый тип сотрудников общественной безопасности, сотрудники уголовно-исполнительной системы (далее – УИС) сталкиваются со специфическими профессиональными рисками [29]. Характерными, негативно влияющими на состояние здоровья сотрудников аспектами УИС являются: военизированный характер службы, риск насилия и агрессии со стороны заключенных, высокий уровень переутомления в контексте воспринимаемых требований работы, низкая независимость, большая продолжительность рабочих смен, нехватка сотрудников, ограниченные возможности психической поддержки и др. Эти особенности являются источниками стресса, выступающего фактором риска нарушения физического и психического здоровья. Наиболее распространенными проблемами со здоровьем у сотрудников исправительных учреждений УИС называются нервно-психические расстройства, признаками которых выступают: нарушение сна, употребление ПАВ (алкоголь, наркотические вещества), табакокурение, психоэмоциональное истощение. Данные особенности указывают исследователи из различных стран [21; 22].

Учитывая значимость профессионального отбора и охраны здоровья сотрудников уголовно-исполнительной системы, 13 декабря 2019 года в России был издан Приказ Федеральной службы исполнения наказаний №1126 «Об утверждении Требований к состоянию здоровья граждан, поступающих на службу в уголовно-исполнительную систему Российской Федерации, сотрудников уголовно-исполнительной системы Российской Федерации, Требований к состоянию здоровья отдельных категорий граждан, поступающих на службу в уголовно-исполнительную систему Российской Федерации, сотрудников уголовно-исполнительной системы Российской Федерации, прохождение службы которых связано с особыми условиями, и перечней дополнительных обязательных диагностических исследований» (далее Приказ ФСИН №1126), определяющий перечень

показателей состояния здоровья сотрудника УИС и обязательных диагностических (клинических) исследований. Особое внимание в нем уделяется показателям психического здоровья. Приказом ФСИН №1126 установлено обязательное медицинское обследование сотрудников УИС врачом-неврологом и врачом-психиатром-наркологом, на наличие следующих психических расстройств:

- «органические психические расстройства;
- симптоматические и другие психические расстройства экзогенной этиологии;
- эндогенные психозы (шизофрения, шизотипические расстройства, шизоаффективные, бредовые, острые и преходящие психотические расстройства и аффективные расстройства (расстройства настроения);
- невротические расстройства, связанные со стрессом, диссоциативные и соматоформные расстройства, психогенные депрессивные состояния и реакции, невротическое развитие личности, хронические постреактивные изменения личности, а также посттравматическое стрессовое расстройство;
- расстройства личности (расстройства привычек и влечений);
- психические расстройства и расстройства поведения, вызванные употреблением психоактивных веществ» [5].

В Приказе ФСИН №1126 отмечается, что нейропсихологическое исследование (клиническая диагностика) сотрудников УИС по данному направлению проводится с помощью проведения оценки по краткой шкале оценки психических функций MMSE (Folstein M. et al., 1975), шкале оценки регуляторных функций (Dubous B. et al., 2000), а также может дополняться и другими методиками. Кроме того, помимо медицинского заключения, составляется служебная характеристика на сотрудника, в которой отражаются: «сведения о его стаже (опыте) работы, способности выполнять служебные обязанности, сведения о влиянии состояния здоровья сотрудника на исполнение им служебных обязанностей, сведения о случаях частых и длительных освобождениях сотрудника от исполнения им служебных обязанностей по болезни, мнение руководителя о целесообразности сохранения сотрудника на службе в связи с состоянием его здоровья. При необходимости указываются факты, свидетельствующие о совершении сотрудником действий, дающих основание предполагать наличие у него психического расстройства, склонности к злоупотреблению алкоголем или немедицинскому употреблению наркотических веществ,

мнение о влиянии указанных обстоятельств на выполнение служебных обязанностей» [5]. Таким образом, при оценке показателей здоровья сотрудников УИС, помимо медицинского (клинического) исследования, важное значение имеет неклиническая диагностика личности, которая может проводится психологом непрерывно в период служебной деятельности.

Научные исследования, проводимые в области психологии служебной деятельности в России и за рубежом подтверждают тезис о том, что психологическая (доклиническая) диагностика может выявить факторы риска психического и физического здоровья. Например, В.А. Шаповал [9] показал, что с помощью психодинамического личностного опросника «Ресурс» на основе оценки качества центральных Я-функций личности, укорененных в области бессознательного, можно спрогнозировать склонность к алкогольной аддикции и состояние профессионального психологического здоровья у сотрудников ОВД. П. Бартоне с коллегами установили, что низкий уровень жизнестойкости и копинг-стратегии избегания связаны со злоупотреблением алкоголем у военнослужащих [12]; высокий уровень жизнестойкости связан с меньшим числом стресс-зависимых нарушений сна [24] и психиатрических жалоб [28]; у сотрудников уголовно-исполнительной системы с низким уровнем психологической устойчивости (резильентности) наблюдается высокий уровень показателей профессионального выгорания, депрессии, тревоги и стресса [18].

К.Б. Молледа и Ф.Х. Родригес-Диас [14] на выборке сотрудников учреждений пенитенциарной системы Испании с помощью «Общего опросника о состоянии здоровья» (GHQ-28) показали, что соматические симптомы физического здоровья взаимосвязаны с факторами психологического здоровья (тревога и бессонница, социальная дисфункция, тяжелая депрессия). Э.Н. Соза и П.Д. Депаула [26] на выборке сотрудников учреждений пенитенциарной системы Аргентины с помощью «Опросника профессионального выгорания» (Maslach Burnout Inventor – MBI) установили взаимосвязь между выгоранием и приверженностью вредным привычкам (курение, нерациональное питание). Чжэн Чжан с коллегами [30] на выборке сотрудников учреждений пенитенциарной системы Китая с помощью авторской анкеты, «Шкалы депрессии, тревоги, стресса» (DASS) и «Афинской шкалы бессонницы» (AIS) оценили степень влияния интенсивности рабочего графика на физическое и психическое здоровье. Е. Сигит-Ковальковска А. Пиотровский, И. Хамза [27] с помощью «Афинской шкалы бессонницы» (AIS), «Опросника совладания со стрессом» (COPE), «Ольденбургского опросника профессионального выгорания» (OLBI) на

выборке в сотрудников учреждений пенитенциарной системы Польши и Индонезии показали, что такие стратегий совладания, как обращение за помощью и вовлеченность предупреждают бессонницу и профессиональное выгорание. И. Хамза [16] на выборке сотрудников учреждений пенитенциарной системы Индонезии с помощью «Опросника психического здоровья» (MHI-38) доказал влияние условий службы на такие показатели, как психологическое благополучие (эмоции, любовь и удовлетворенность) и психологический дистресс (тревога, депрессия и потеря контроля). Р.Н. Карлтон с коллегами [15] с помощью «Контрольного списка посттравматического стрессового расстройства» (PCL-5), «Опросника здоровья пациента» (PHQ-9), «Шкалы генерализованного тревожного расстройства» (GAD-7), «Шкалы самооценки тяжести симптомов панического расстройства» (PDSS-SR), «Теста на выявление расстройств, связанных с употреблением алкоголя» (AUDIT) изучили распространенность психических расстройств на выборке сотрудников учреждений пенитенциарной системы Канады. А. Пиотровский [25] на выборке сотрудников учреждений пенитенциарной системы Польши изучил во взаимосвязи показатели физического (самоотчет о частоте головных болей, гипертонии, нарушениях сна, приеме обезболивающих, несчастных случаях во время службы) и психического здоровья (профессиональный стресс – Опросник совладания со стрессом (COPE). Ч. Кумбалатара, О. Джонс и Дж. МакДэниел [22] на выборке сотрудников учреждений пенитенциарной системы США с помощью интервьюирования оценили влияние профессионального стресса на физическое и психическое здоровье. Анкета включала три раздела: эмоциональные (депрессивные симптомы, эмоциональное истощение, деперсонализация), установочные (приверженность работе и удовлетворенность ею, воспринимаемая поддержка со стороны администрации, намерение уйти с работы) и поведенческие (злоупотребление психоактивными веществами, проблемы со сном, физические симптомы, такие как головная боль, боли в груди и боли в животе) признаки.

Таким образом, психологическая (неклиническая) диагностика личностной сферы сотрудников УИС на основе самооценки может быть использована для непрерывного мониторинга факторов риска профессионального выгорания и возможных проблем со здоровьем.

Целью настоящего исследования является изучение факторов риска (нарушение сна, употребление ПАВ, психоэмоциональное истощение) и состояния здоровья сотрудников УИС на основе самооценки во взаимосвязи с профессиональной жизнестойкостью и выгоранием.

Материалы и методы исследования

Участники исследования. Исследование проводилось в 2024 году в Ивановской области среди сотрудников УИС. В исследовании приняло участие 34 человека мужского пола в возрасте от 23 до 49 лет (M=23,5 года).

Методический инструментарий.

Были собраны социально-демографические данные о поле, возрасте, стаже профессиональной деятельности.

Для оценивания личностных характеристик использовались опросники:

− Профессиональная жизнестойкость (Occupational Hardiness Questionnaire – OHQ) (Морено-Джименез с соавт., русскоязычная версия Е.А. Шмелевой, П.А. Кислякова) [3] (15 пунктов по 5-балльной шкале Ликерта: от 0 до 4). Рассчитывалась сумма баллов по опроснику (от 0 до 60), больший балл демонстрирует большее проявление жизнестойкости;

− Опросник профессионального выгорания (MBI) (К. Маслач, русскоязычная версия Н.Е. Водопьяновой) (22 пункта по 7-балльной шкале Ликерта: от 0 до 6). Рассчитывалась сумма баллов по шкалам эмоциональное истощение (от 0 до 54), деперсонализация (от 0 до 30), редукция профессиональных достижений (от 0 до 48), больший балл демонстрирует большее проявление признака, также рассчитывался индекс синдрома выгорания по формуле НИПНИ им. Бехтерева (от 0 – нет выгорания до 1 – максимальное выгорание).

Для оценивания факторов риска (нарушение сна, употребление ПАВ, психоэмоциональное истощение) и состояния здоровья использовались опросники:

− Шкала субъективного благополучия (А. Бадо и Г.А. Мендельсон, русскоязычная версия М.В. Соколовой) – для анализа использовались шкалы «Самооценка здоровья» (вопросы «Я чувствую себя здоровым и бодрым», «В последнее время я чувствую себя в прекрасной форме»), «Признаки, сопровождающие негативную психоэмоциональную симптоматику» (вопросы «Иногда я становлюсь беспокойным по неизвестной причине», «В последнее время я чрезмерно реагирую на незначительные препятствия и неудачи»), «Качество сна» (вопросы «В последнее время я хорошо сплю», «Утром мне трудно вставать и работать») (по 7-балльной шкале Ликерта: от 1 до 7). Рассчитывалась сумма баллов по шкалам (от 2 до 14), больший балл демонстрирует большее проявление признака;

− Опросник совладания со стрессом (COPE) (К. Карвер, М. Шейер, Дж. Вейнтрауб, русскоязычная экспресс-версия Е.В. Куфтяк, В.И. Кисициной) – для анализа использовалась шкала «Использование успокоительных»

(использование алкоголя, лекарственных средств или наркотиков как способ избегания проблемы и улучшения самочувствия) (два пункта по 4-балльной шкале Ликерта: от 0 до 3). Рассчитывалась сумма баллов по шкале (от 0 до 6), больший балл демонстрирует большее проявление признака.

Анализ данных. Полученные эмпирические данные осмысливались и обрабатывались с помощью качественных и количественных методов анализа, в том числе: анализ процентных соотношений, описательные статистики, корреляционный анализ Спирмена. Расчеты производились на базе пакета статистических программ SPSS 26.

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты диагностики представлены в таблице 1 и на рисунках 1-6.

Таблица 1.

Описательные статистики

Шкалы	Минимальное значение	Максимальное значение	Среднее значение	Стандартное отклонение
Профессиональная жизнестойкость (OHQ)	11	60	43,00	10,94
Индекс выгорания (MBI)	0,1	0,7	0,31	0,14
Самооценка здоровья	3	14	11,18	2,59
Признаки, сопровождающие негативную психоэмоциональную симптоматику	2	10	5,5	2,18
Качество сна	4	14	10,06	2,52
Использование «успокоительных» (COPE)	0	4	0,77	1,27

Дескриптивный анализ позволил установить, что средние баллы профессиональной жизнестойкости в исследуемой выборке чуть выше среднего (рис. 1), что согласуется с результатами, полученными нами на выборке студентов [4]. Данные, полученные другими авторами, на выборках сотрудников УИС также подтверждают средний и чуть выше среднего уровень жизнестойкости [1; 8].

Почти все испытуемые указали, что имеют хорошее или удовлетворительное здоровье, как в целом, так и по отдельным показателям (качество сна, отсутствие негативной психоэмоциональной симптоматики, низкий уровень выгорания, не злоупотребление ПАВ). Что в целом соответствует требованиям профессионального отбора, который регулярно проходят все

сотрудники УИС. Вместе с тем, около 17% испытуемых продемонстрировали средние и ниже среднего значения самооценки своего здоровья (рис. 2).

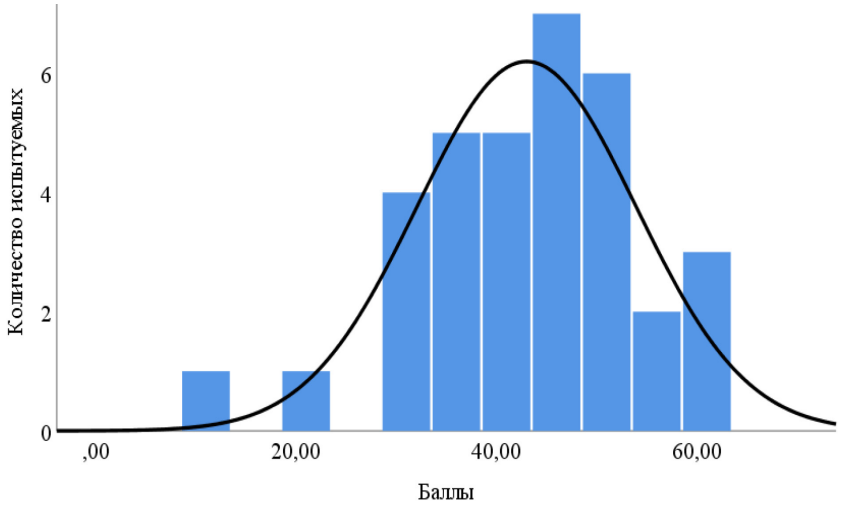


Рис. 1. Распределение испытуемых по результатам методики «Профессиональная жизнестойкость» (OHQ)

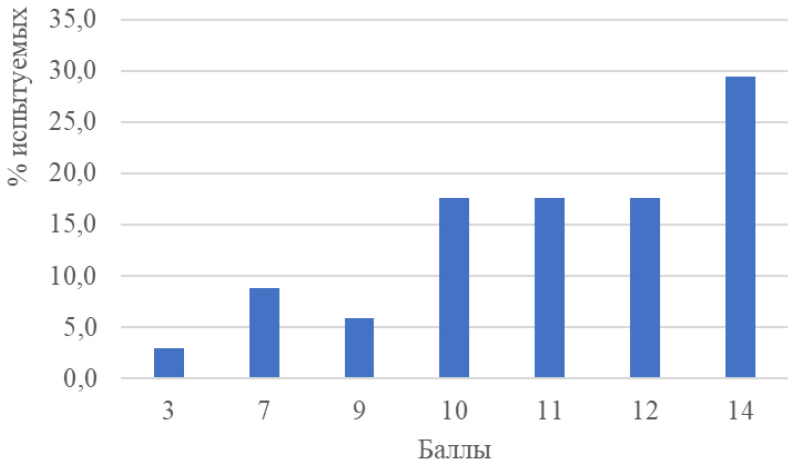


Рис. 2. Распределение испытуемых по результатам шкалы «Самооценка здоровья»

Исследование, проведенное М.Е. Усачевой и М.Ю. Худаевой, показало, что сотрудники УИС оценивают свое здоровье на среднем уровне (среднее значение 7,77 баллов), что указывает на периодические эмоциональные колебания, требующие дополнительной поддержки [6]. Исследования самооценки здоровья сотрудников исправительных учреждений Польши, показало, что около 11% и около 9% опрошенных часто и очень часто имеют проблемы, связанные с гипертонией и головными болями соответственно, а почти 18% и 28% соответственно испытывают их время от времени. При анализе этих данных следует учитывать сравнительно молодой возраст сотрудников [25].

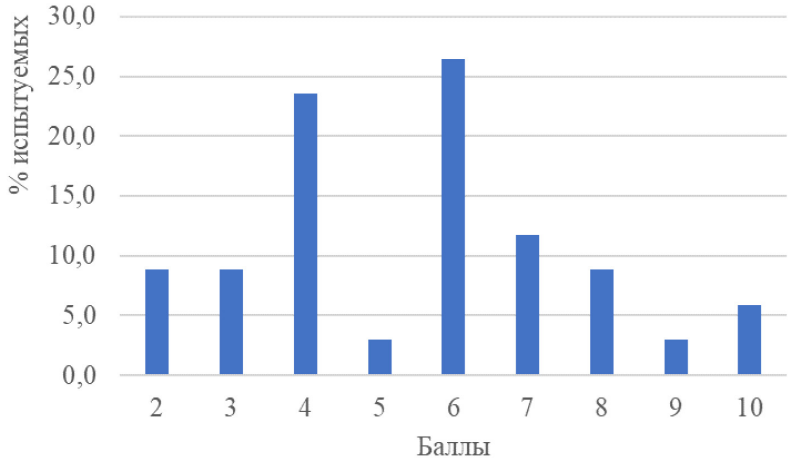


Рис. 3. Распределение испытуемых по результатам шкалы «Признаки, сопровождающие негативную психоэмоциональную симптоматику»

Около 70% испытуемых имеют средние и ниже средних значения оценок признаков, сопровождающих негативную психоэмоциональную симптоматику (рис. 3); около 67% испытуемых продемонстрировали признаки профессионального выгорания разной степени (индекс выгорания от 0,1 до 0,3), из них около 5% – имеют высокие значения индекса выгорания (рис. 4). По данным исследования Д.П. Борисовой и Н.В. Дворянчикова около 10% сотрудников УИС имеют начальную стадию формирования синдрома эмоционального «выгорания» [2]. Как показало исследование Министерства юстиции США [23], около 25% сотрудников исправитель-

ных учреждений США сообщили симптомы психологического стресса. Более раннее исследование в Канаде показало, что предполагаемая частота выгорания среди сотрудников исправительных учреждений составляет 37% [13], а исследование в Болгарии сообщило, что частота выгорания среди сотрудников исправительных учреждений достигает 74,5% [17]. Высокая частота выгорания (53%) среди сотрудников исправительных учреждений также была зарегистрирована в Китае [29].

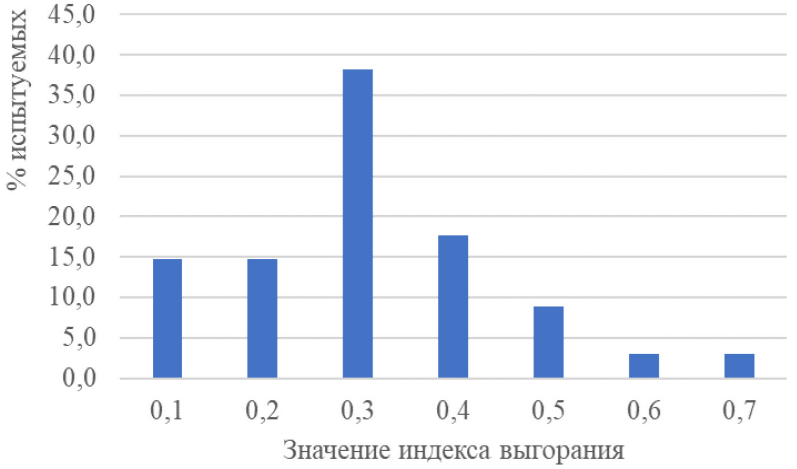


Рис. 4. Распределение испытуемых по Индексу выгорания (MBI)

Около 12% испытуемых имеют средние и ниже средних значения оценок качества сна (рис. 5). Исследование, проведенное среди сотрудников пенитенциарных учреждений Польши и Индонезии показали, что около 40% из них имеют различные расстройства сна. При этом установлена связь между профессиональным выгоранием и бессонницей [27]. Бессонница может вызвать нарушение дневного функционирования и ряд негативных последствий для здоровья сотрудников исправительных учреждений, включая усталость, раздражительность и плохое настроение. Зарубежными исследователями установлено, что бессонница, вызванная стрессом, может привести к физическому и психологическому истощению. Сотрудники исправительных учреждений, страдающие бессонницей, подвергаются повышенному риску развития выгорания [11, 19, 20].

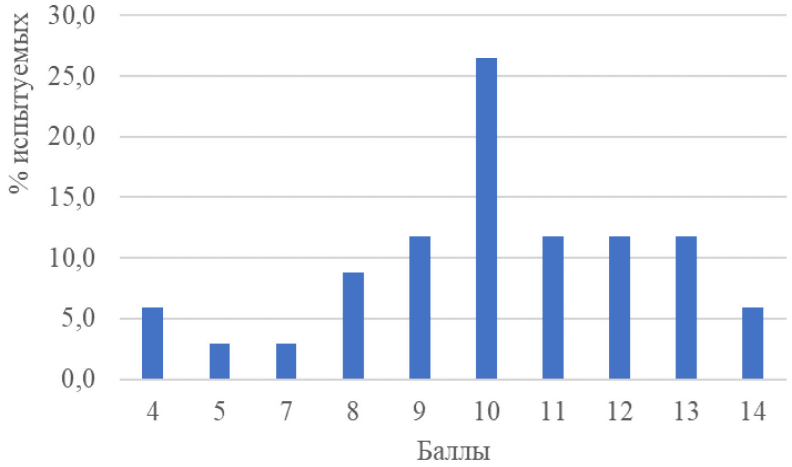


Рис. 5. Распределение испытуемых по результатам шкалы «Качество сна»

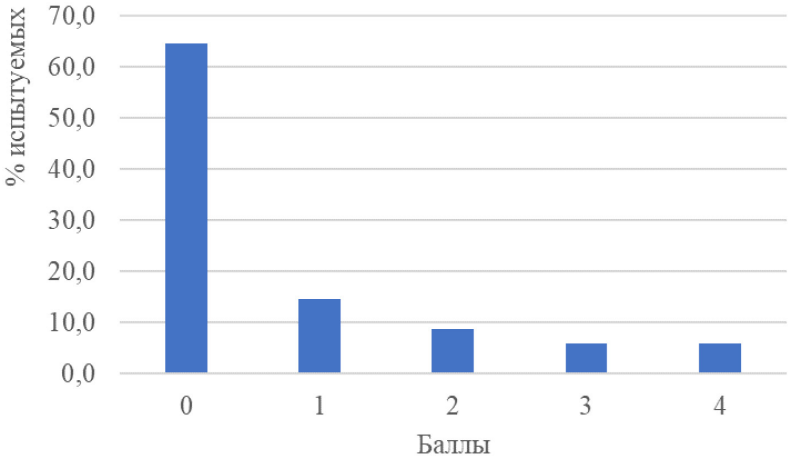


Рис. 6. Распределение испытуемых по результатам шкалы «Использование успокоительных» (COPE)

Около 10% испытуемых часто или время от времени употребляют алкоголь или успокоительные, чтобы справиться со стрессом (рис. 6). Ис-

следование, проведенное А.Ф. Федоровым и М.Е. Афанасьевым среди сотрудников исправительной колонии позволило выявить у 37% признаки бытового пьянства, у 12% – признаки алкоголизма [7]. Исследование, проведенное на выборке сотрудников учреждений пенитенциарной системы США показало, что около 70% употребляют алкоголь, 17% – принимают снотворные, около 9% – употребляют наркотические вещества [22].

Для установления взаимосвязи между исследуемыми переменными был применен корреляционный анализ Спирмена (таблица 2). Корреляционный анализ позволил установить прямую связь между самооценкой сотрудниками УИС факторов риска, состоянием здоровья, профессиональным выгоранием и профессиональной жизнестойкостью. Более высокая самооценка состояния здоровья сопровождается положительной оценкой качества сна, отсутствием признаков, сопровождающих негативную психоэмоциональную симптоматику, низким уровнем профессионального выгорания, не злоупотреблением ПАВ (алкоголь, наркотические вещества). При этом более высокая самооценка состояния здоровья и его показателей наблюдается у сотрудников УИС с высоким уровнем профессиональной жизнестойкости.

Таблица 2.

Результаты корреляционного анализа ($p \leq 0,01$)

Шкалы	Профессиональная жизнестойкость (OHQ)	Самооценка здоровья	Признаки, сопровождающие негативную психоэмоциональную симптоматику	Качество сна	Индекс выгорания (MBI)
Самооценка здоровья	0,609	-	-	-	-
Признаки, сопровождающие негативную психоэмоциональную симптоматику	-0,212	-0,499	-	-	-
Качество сна	0,294	0,438	-0,578	-	-
Индекс выгорания (MBI)	-0,475	-0,465	0,592	-0,552	-
Использование «успокоительных» (COPE)	-0,117	-0,251	0,353	-0,374	0,288

Заключение

В определенных обстоятельствах служебная деятельность вызывает у сотрудников уголовно-исполнительной системы переутомление и стресс,

который со временем может привести к серьезным проблемам со здоровьем и психическим расстройствам (депрессия, расстройства настроения, бессонница и пр.). Хронический стресс приводит к профессиональному выгоранию и, как следствие, к профессиональной деформации и уходу из профессии. Анализ эмпирических данных подтверждает, что самооценка здоровья и его показателей (нарушение сна, употребление ПАВ, психоэмоциональное истощение) взаимосвязаны с профессиональным выгоранием и профессиональной жизнестойкостью. Таким образом, жизнестойкость как личностная характеристика может выступать стратегией, помогающей справиться с профессиональными трудностями и сохранить психическое и физическое здоровье. В связи с этим доклиническая (психологическая) диагностика на основе самооценок сотрудников позволяет получить достаточно реалистичные представления о состоянии их психического и физического здоровья, а также выявить те факторы риска его нарушения, которые возможно нивелировать, если своевременно принять соответствующие меры.

К ограничениям результатов следует отнести то, что исследование проводилось на неслучайной выборке с использованием только самоотчетов.

Заключение комитета по этике. Исследование было проведено в соответствии с принципами положения Хельсинкской декларации Всемирной медицинской ассоциации (Declaration of Helsinki, and approved by the Institutional Review Board), а также Этическим кодексом психолога Российского психологического общества.

Информированное согласие. Информированное согласие было получено от всех субъектов, участвовавших в исследовании.

Информация о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

1. Басина, Т. А. (2024). Особенности совладания со стрессом сотрудников уголовно-исполнительной системы с учётом уровня их жизнестойкости. *Вестник Государственного университета просвещения. Серия: Психологические науки*, (1), 121–130. https://doi.org/10.18384/2949-5105-2024-1-121-130. EDN: https://elibrary.ru/NFIMMW
2. Борисова, Д. П., & Дворянчиков, Н. В. (2019). Взаимосвязь проявления синдрома эмоционального «выгорания» и отклоняющегося поведения у сотрудников УИС. *Психология и право*, *9*(2), 15–38. https://doi.org/10.17759/psylaw.2019090203. EDN: https://elibrary.ru/TLYWJB

3. Кисляков, П. А., & Шмелева, Е. А. (2024). *Психологическая безопасность: психодиагностика*. Красноярск: Общество с ограниченной ответственностью «Научно-инновационный центр», 270 с. ISBN 978-5-907608-21-4. https://doi.org/10.12731/978-5-907608-21-4. EDN: https://elibrary.ru/PKDNPU
4. Кисляков, П. А., Шмелева, Е. А., Меерсон, А.-Л. С., & Фан, Ч. К. (2023). Влияние учебно-профессиональной жизнестойкости на субъективное благополучие студентов социономического профиля: роль стилей совладания. *Образование и наука*, *25*(9), 118–155. https://doi.org/10.17853/1994-5639-2023-9-118-155. EDN: https://elibrary.ru/NHEOJJ
5. Федеральная служба исполнения наказаний. (2019). Об утверждении Требований к состоянию здоровья граждан, поступающих на службу в уголовно-исполнительную систему Российской Федерации, сотрудников уголовно-исполнительной системы Российской Федерации, Требований к состоянию здоровья отдельных категорий граждан, поступающих на службу в уголовно-исполнительную систему Российской Федерации, сотрудников уголовно-исполнительной системы Российской Федерации, прохождение службы которых связано с особыми условиями, и перечней дополнительных обязательных диагностических исследований: Приказ от 13 декабря 2019 г. № 1126. *Российская газета*, 12 февраля 2020 г. URL: https://rg.ru/documents/2020/02/12/fsin-prikaz1126-site-dok.html
6. Усачева, М. Е., & Худаева, М. Ю. (2024). Особенности психологического здоровья и субъективного благополучия у сотрудников уголовно-исполнительной системы. *Вестник науки*, *4*(6), 1023–1030. URL: https://www.вестник-науки.рф/article/16359. EDN: https://elibrary.ru/BLAFHR
7. Федоров, А. Ф., & Афанасьев, М. Е. (2014). Эмпирическое исследование алкоголизма у сотрудников Федерального казённого учреждения исправительной колонии № 7 (ФКУ ИК-7) УФСИН России по Владимирской области. *Молодой учёный*, (8), 929–935. URL: https://moluch.ru/archive/67/11230. EDN: https://elibrary.ru/SFSANF
8. Цветкова, Н. А., & Кулакова, С. В. (2019). Исследование стрессоустойчивости и жизнестойкости сотрудников уголовно-исполнительной системы. *Психология и право*, *9*(2), 112–129. https://doi.org/10.17759/psylaw.2019090208. EDN: https://elibrary.ru/JBGLRL
9. Шаповал, В. А. (2021). Психодинамические личностные предикторы склонности к алкогольной аддикции сотрудников органов внутренних дел. *Российский девиантологический журнал*, (1–2), 265–275. https://doi.org/10.35750/2713-0622-2021-2-265-275. EDN: https://elibrary.ru/KGHAVI

10. Шмелева, Е. А., Кисляков, П. А., Карасева, Т. В., & Прияткин, Д. А. (2024). Профессиональная жизнестойкость и психологическая безопасность медицинских работников. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *16*(2), 450–480. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2024-16-2-1079. EDN: https://elibrary.ru/OINKIQ
11. Allison, P., Tiesman, H. M., Wong, I. S., Bernzweig, D., James, L., James, S. M., Navarro, K. M., & Patterson, P. D. (2022). Working hours, sleep, and fatigue in the public safety sector: a scoping review of the research. *American Journal of Industrial Medicine*, *65*(11), 878–897. https://doi.org/10.1002/ajim. EDN: https://elibrary.ru/RTKMVV
12. Bartone, P. T., Hystad, S. W., Eid, J., & Brevik, J. I. (2012). Psychological hardiness and coping style as risk/resilience factors for alcohol abuse. *Military Medicine*, *177*(5), 517–524. PMID: 22645877. https://doi.org/10.7205/milmed-d-11-00200
13. Bourbonnais, R., Malenfant, R., Vézina, M., Jauvin, N., & Brisson, I. (2005). Les caractéristiques du travail et la santé des agents en services de détention. *Revue d'Épidémiologie et de Santé Publique*, *53*(2), 127–142. https://doi.org/10.1016/s0398-7620(05)84583-3
14. Bringas-Molleda, C., Fernández-Muñiz, A., Álvarez-Fresno, E., Martínez-Cordero, A., & Rodríguez-Díaz, F. J. (2015). Influencia del síndrome de Burnout en la salud de los trabajadores penitenciarios. *Revista Española de Sanidad Penitenciaria*, *17*, 37–46.
15. Carleton, R. N., Ricciardelli, R., Taillieu, T., Mitchell, M. M., Andres, E., & Afifi, T. O. (2020). Provincial Correctional Service Workers: The Prevalence of Mental Disorders. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *17*(7), 2203. https://doi.org/10.3390/ijerph17072203. EDN: https://elibrary.ru/EEHNRL
16. Hamzah, I. (2024). Mental health conditions among correctional officers in Nusakambangan, Indonesia. *Malahayati International Journal of Nursing and Health Science*, *7*, 196–205. https://doi.org/10.33024/minh.v7i2.140. EDN: https://elibrary.ru/CKQPEE
17. Harizanova, S. N., & Tarnovska, T. H. (2013). Professional burnout syndrome among correctional facility officers. *Folia Medica (Plovdiv)*, *55*(2), 73–79. https://doi.org/10.2478/folmed-2013-0020
18. Huang, Y., Guo, H., Wang, S., Zhong, S., He, Y., Chen, H., Zhou, J., & Wang, X. (2024). Relationship between work-family conflict and anxiety/depression among Chinese correctional officers: a moderated mediation model of burnout and resilience. *BMC Public Health*, *24*(1), 17. https://doi.org/10.1186/s12889-023-17514-6. EDN: https://elibrary.ru/TKHJRQ

19. James, L., & Todak, N. (2017). The negative impact of prison work on sleep health. *American Journal of Industrial Medicine*, *60*(5), 449–456. https://doi.org/10.1002/ajim.22714
20. James, L., & Todak, N. (2018). Prison employment and post-traumatic stress disorder: Risk and protective factors. *American Journal of Industrial Medicine*. https://doi.org/10.1002/ajim.22869
21. Jayawardene, W., Erbe, R., Lohrmann, D., & Torabi, M. (2017). Use of treatment and counseling services and mind-body techniques by students with emotional and behavioral difficulties. *Journal of School Health*, *87*(2), 133–141. https://doi.org/10.1111/josh.12475
22. Jayawardene, W., Kumbalatara, C., Jones, A., & McDaniel, J. (2024). Work stress and psychoactive substance use among correctional officers in the USA. *Psychoactives*, *3*, 65–77. https://doi.org/10.3390/psychoactives3010005. EDN: https://elibrary.ru/ZJEROU
23. National Institute of Justice. (2023). *Research on the mounting problem of correctional officer stress*. Retrieved from: https://www.ojp.gov/pdffiles1/nij/308211.pdf (accessed on 18 September 2024)
24. Nordmo, M., Hystad, S. W., Sanden, S., & Johnsen, B. H. (2017). The effect of hardiness on symptoms of insomnia during a naval mission. *International Maritime Health*, *68*(3), 147–152. https://doi.org/10.5603/IMH.2017.0026
25. Piotrowski, A. (2018). Samoocena stanu zdrowia, wypadki w trakcie służby i profilaktyka stresu zawodowego w służbie więziennej [Self-assessment of health status, accidents during service and prevention of occupational stress in prison service]. *Medycyna Pracy*, *69*(4), 425–438. https://doi.org/10.13075/mp.5893.00535
26. Soza, E. N., & Depaula, P. D. (2023). Burnout and habits harmful to the health of employees in the Argentine federal prison system. *Revista Española de Sanidad Penitenciaria*, *25*(2), 45–56. https://doi.org/10.18176/resp.00067. EDN: https://elibrary.ru/JKKORA
27. Sygit-Kowalkowska, E., Piotrowski, A., & Hamzah, I. (2021). Insomnia among prison officers and its relationship with occupational burnout: the role of coping with stress in Polish and Indonesian samples. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *18*, 4282. https://doi.org/10.3390/ijerph18084282. EDN: https://elibrary.ru/XBISCX
28. Thomassen, A. G., & Hystad, S. W. (2015). The combined influence of hardiness and cohesion on mental health in a military peacekeeping mission: A prospective study. *Scandinavian Journal of Psychology*, *56*(5), 560–566. https://doi.org/10.1111/sjop.12235

29. Wang, J., Huang, Y., Wang, S., Zhang, Z., He, Y., Wang, X., & Guo, H. (2024). The impact of workplace violence on job burnout among Chinese correctional officers: the chain mediating effects of stress and insomnia. *BMC Public Health*, *24*(1), 566. https://doi.org/10.1186/s12889-024-18048-1. EDN: https://elibrary.ru/GLENDB
30. Zhang, Z., Li, Y., Wang, S., Wang, J., Huang, Y., Wang, X., Guo, H., & Zhou, J. (2024). Exploring the impact of workplace violence on the mental health of Chinese correctional officers: a JD-R model approach. *Psychology Research and Behavioral Management*, *17*, 2865–2874. https://doi.org/10.2147/PRBM.S468370. EDN: https://elibrary.ru/HSKSJL

References

1. Basina, T. A. (2024). Features of coping with stress among employees of the penal system, taking into account their level of resilience. *Bulletin of the State University of Education. Series: Psychological Sciences*, *(1)*, 121–130. https://doi.org/10.18384/2949-5105-2024-1-121-130. EDN: https://elibrary.ru/NFIMMW
2. Borisova, D. P., & Dvoryanchikov, N. V. (2019). The relationship between the manifestation of emotional burnout syndrome and deviant behavior among penal system employees. *Psychology and Law*, *9*(2), 15–38. https://doi.org/10.17759/psylaw.2019090203. EDN: https://elibrary.ru/TLYWJB
3. Kislyakov, P. A., & Shmeleva, E. A. (2024). *Psychological safety: Psychodiagnostics*. Krasnoyarsk: Limited Liability Company «Scientific Innovation Center». 270 pp. ISBN 978-5-907608-21-4. https://doi.org/10.12731/978-5-907608-21-4. EDN: https://elibrary.ru/PKDNPU
4. Kislyakov, P. A., Shmeleva, E. A., Meerson, A. L. S., & Fan, Ch. K. (2023). The influence of educational and professional resilience on subjective well-being of students in the socionomic field: the role of coping styles. *Education and Science*, *25*(9), 118–155. https://doi.org/10.17853/1994-5639-2023-9-118-155. EDN: https://elibrary.ru/NHEOJJ
5. Federal Penitentiary Service. (2019). *On approval of the Requirements for the health status of citizens applying for service in the penal system of the Russian Federation, employees of the penal system of the Russian Federation; Requirements for the health status of certain categories of citizens applying for service in the penal system of the Russian Federation, employees of the penal system of the Russian Federation whose service is associated with special conditions; and lists of additional mandatory diagnostic studies*: Order No. 1126 dated December 13, 2019. *Rossiyskaya Gazeta*, February 12, 2020. Retrieved from: https://rg.ru/documents/2020/02/12/fsin-prikaz1126-site-dok.html

6. Usacheva, M. E., & Khudaeva, M. Yu. (2024). Features of psychological health and subjective well-being among employees of the penal system. *Bulletin of Science*, *4*(6), 1023–1030. Retrieved from: https://www.вестник-науки.рф/article/16359. EDN: https://elibrary.ru/BLAFHR
7. Fedorov, A. F., & Afanasyev, M. E. (2014). Empirical study of alcoholism among employees of Federal State Institution Correctional Colony No. 7 (FSI CC 7) of the FPS of Russia in the Vladimir Region. *Young Scientist*, *(8)*, 929–935. Retrieved from: https://moluch.ru/archive/67/11230. EDN: https://elibrary.ru/SFSANF
8. Tsvetkova, N. A., & Kulakova, S. V. (2019). Study of stress resistance and resilience among employees of the penal system. *Psychology and Law*, *9*(2), 112–129. https://doi.org/10.17759/psylaw.2019090208. EDN: https://elibrary.ru/JBGLRL
9. Shapoval, V. A. (2021). Psychodynamic personality predictors of inclination to alcohol addiction among law enforcement officers. *Russian Journal of Deviant Behavior*, *(1–2)*, 265–275. https://doi.org/10.35750/2713-0622-2021-2-265-275. EDN: https://elibrary.ru/KGHAVI
10. Shmeleva, E. A., Kislyakov, P. A., Karaseva, T. V., & Priyatkin, D. A. (2024). Professional resilience and psychological safety of healthcare workers. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *16*(2), 450–480. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2024-16-2-1079. EDN: https://elibrary.ru/OINKIQ
11. Allison, P., Tiesman, H. M., Wong, I. S., Bernzweig, D., James, L., James, S. M., Navarro, K. M., & Patterson, P. D. (2022). Working hours, sleep, and fatigue in the public safety sector: a scoping review of the research. *American Journal of Industrial Medicine*, *65*(11), 878–897. https://doi.org/10.1002/ajim. EDN: https://elibrary.ru/RTKMVV
12. Bartone, P. T., Hystad, S. W., Eid, J., & Brevik, J. I. (2012). Psychological hardiness and coping style as risk/resilience factors for alcohol abuse. *Military Medicine*, *177*(5), 517–524. PMID: 22645877. https://doi.org/10.7205/milmed-d-11-00200
13. Bourbonnais, R., Malenfant, R., Vézina, M., Jauvin, N., & Brisson, I. (2005). Les caractéristiques du travail et la santé des agents en services de détention. *Revue d'Épidémiologie et de Santé Publique*, *53*(2), 127–142. https://doi.org/10.1016/s0398-7620(05)84583-3
14. Bringas-Molleda, C., Fernández-Muñiz, A., Álvarez-Fresno, E., Martínez-Cordero, A., & Rodríguez-Díaz, F. J. (2015). Influencia del síndrome de Burnout en la salud de los trabajadores penitenciarios. *Revista Española de Sanidad Penitenciaria*, *17*, 37–46.

15. Carleton, R. N., Ricciardelli, R., Taillieu, T., Mitchell, M. M., Andres, E., & Afifi, T. O. (2020). Provincial Correctional Service Workers: The Prevalence of Mental Disorders. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *17*(7), 2203. https://doi.org/10.3390/ijerph17072203. EDN: https://elibrary.ru/EEHNRL
16. Hamzah, I. (2024). Mental health conditions among correctional officers in Nusakambangan, Indonesia. *Malahayati International Journal of Nursing and Health Science*, *7*, 196–205. https://doi.org/10.33024/minh.v7i2.140. EDN: https://elibrary.ru/CKQPEE
17. Harizanova, S. N., & Tarnovska, T. H. (2013). Professional burnout syndrome among correctional facility officers. *Folia Medica (Plovdiv)*, *55*(2), 73–79. https://doi.org/10.2478/folmed-2013-0020
18. Huang, Y., Guo, H., Wang, S., Zhong, S., He, Y., Chen, H., Zhou, J., & Wang, X. (2024). Relationship between work-family conflict and anxiety/depression among Chinese correctional officers: a moderated mediation model of burnout and resilience. *BMC Public Health*, *24*(1), 17. https://doi.org/10.1186/s12889-023-17514-6. EDN: https://elibrary.ru/TKHJRQ
19. James, L., & Todak, N. (2017). The negative impact of prison work on sleep health. *American Journal of Industrial Medicine*, *60*(5), 449–456. https://doi.org/10.1002/ajim.22714
20. James, L., & Todak, N. (2018). Prison employment and post-traumatic stress disorder: Risk and protective factors. *American Journal of Industrial Medicine*. https://doi.org/10.1002/ajim.22869
21. Jayawardene, W., Erbe, R., Lohrmann, D., & Torabi, M. (2017). Use of treatment and counseling services and mind-body techniques by students with emotional and behavioral difficulties. *Journal of School Health*, *87*(2), 133–141. https://doi.org/10.1111/josh.12475
22. Jayawardene, W., Kumbalatara, C., Jones, A., & McDaniel, J. (2024). Work stress and psychoactive substance use among correctional officers in the USA. *Psychoactives*, *3*, 65–77. https://doi.org/10.3390/psychoactives3010005. EDN: https://elibrary.ru/ZJEROU
23. National Institute of Justice. (2023). *Research on the mounting problem of correctional officer stress*. Retrieved from: https://www.ojp.gov/pdffiles1/nij/308211.pdf (accessed on 18 September 2024)
24. Nordmo, M., Hystad, S. W., Sanden, S., & Johnsen, B. H. (2017). The effect of hardiness on symptoms of insomnia during a naval mission. *International Maritime Health*, *68*(3), 147–152. https://doi.org/10.5603/IMH.2017.0026
25. Piotrowski, A. (2018). Samoocena stanu zdrowia, wypadki w trakcie służby i profilaktyka stresu zawodowego w służbie więziennej [Self-assessment of health

status, accidents during service and prevention of occupational stress in prison service]. *Medycyna Pracy*, *69*(4), 425–438. https://doi.org/10.13075/mp.5893.00535

26. Soza, E. N., & Depaula, P. D. (2023). Burnout and habits harmful to the health of employees in the Argentine federal prison system. *Revista Española de Sanidad Penitenciaria*, *25*(2), 45–56. https://doi.org/10.18176/resp.00067. EDN: https://elibrary.ru/JKKORA
27. Sygit-Kowalkowska, E., Piotrowski, A., & Hamzah, I. (2021). Insomnia among prison officers and its relationship with occupational burnout: the role of coping with stress in Polish and Indonesian samples. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *18*, 4282. https://doi.org/10.3390/ijerph18084282. EDN: https://elibrary.ru/XBISCX
28. Thomassen, A. G., & Hystad, S. W. (2015). The combined influence of hardiness and cohesion on mental health in a military peacekeeping mission: A prospective study. *Scandinavian Journal of Psychology*, *56*(5), 560–566. https://doi.org/10.1111/sjop.12235
29. Wang, J., Huang, Y., Wang, S., Zhang, Z., He, Y., Wang, X., & Guo, H. (2024). The impact of workplace violence on job burnout among Chinese correctional officers: the chain mediating effects of stress and insomnia. *BMC Public Health*, *24*(1), 566. https://doi.org/10.1186/s12889-024-18048-1. EDN: https://elibrary.ru/GLENDB
30. Zhang, Z., Li, Y., Wang, S., Wang, J., Huang, Y., Wang, X., Guo, H., & Zhou, J. (2024). Exploring the impact of workplace violence on the mental health of Chinese correctional officers: a JD-R model approach. *Psychology Research and Behavioral Management*, *17*, 2865–2874. https://doi.org/10.2147/PRBM.S468370. EDN: https://elibrary.ru/HSKSJL

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Кисляков Павел Александрович, доктор психологических наук, доцент, профессор кафедры психологии, конфликтологии и бихевиористики; профессор кафедры русистики, этноориентированной педагогики и цифровой дидактики; главный научный сотрудник
Российский государственный социальный университет; Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы; Федеральное казенное учреждение «Научно-исследовательский институт Федеральной службы исполнения наказаний»
ул. В.Пика, 4, стр.1, г. Москва, 129226, Российская Федерация; ул. Миклухо-Маклая, 6, г. Москва, 117198, Российская Федерация; ул. Житная, 14; г. Москва, 119991, Российская Федерация
pack.81@mail.ru

Цветкова Надежда Александровна, доктор психологических наук, доцент, главный научный сотрудник
Федеральное казенное учреждение «Научно-исследовательский институт Федеральной службы исполнения наказаний»
ул. Житная, 14; г. Москва, 119991, Российская Федерация
TsvetkovaNA@yandex.ru

DATA ABOUT THE AUTHORS

Pavel A. Kislyakov, Dr. Sci. (Psychology), Associate Professor, Professor of the Department of Psychology, Conflictology and Behavioral Sciences; Professor of the Department of Russian Studies, Ethnic-Oriented Pedagogy, and Digital Didactics at the Institute of the Russian Language; Chief Scientific Officer
Russian State Social University; Peoples' Friendship University of Russia; Research Institute of the Federal Penitentiary Service
4, p.1, V.Pika Str., Moscow, 129226, Russian Federation; 6, Miklukho-Maklaya Str., Moscow, 117198, Russian Federation; 14, Zhitnaya Str., Moscow, 119991, Russian Federation
pack.81@mail.ru
SPIN-code: 1375-5625
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1238-9183
ResearcherID: E-4701-2016
Scopus Author ID: 56348736600

Nadezhda A. Tsvetkova, Dr. Sci. (Psychology), Associate Professor; Chief Scientific Officer
Research Institute of the Federal Penitentiary Service
14, Zhitnaya Str., Moscow, 119991, Russian Federation
TsvetkovaNA@yandex.ru
SPIN-code: 1681-2189
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0967-205X
ResearcherID: V-1958-2017
Scopus Author ID: 57190443351

Поступила 25.01.2025 Received 25.01.2025
После рецензирования 11.02.2025 Revised 11.02.2025
Принята 01.03.2025 Accepted 01.03.2025

ОПЫТ РЕГИОНОВ

EXPERIENCE OF REGIONS

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-4-1496 **EDN: JOWAYV**
UDC 631.51

CC BY NC ND

Original article

ISSUES OF IMPROVING CROP PRODUCTION IN DIGITAL AGRICULTURE

V.A. Pogonyshev, V.E. Torikov,
D.A. Pogonysheva, Ya.S. Kovalev

Abstract

Background. The agribusiness ensures the country's food security, creates conditions for forming labour and demographic potential. The key industry is crop production.

Purpose. To study the state of crop production in the Bryansk region.

Materials and methods. The materials and methods of the study present an analytical review of agricultural innovations in crop production based on scientific and technical achievements.

Results. It is shown that the region is among the leaders in the potato and grain production, and the number of profit-making organizations using resource-saving technologies is growing. The specifics of the crop production transformation into a high-tech and knowledge-intensive sphere are noted. It has been established that large and medium-sized organizations make use of digital agricultural innovations and "smart" agricultural machinery. The problems in staffing for agricultural enterprises have been identified. The ways of their solution are considered. The requirements of modern crop production for "digital" agronomists are analyzed. The necessity of further cooperation between the state, business, agrarian science, and education is shown.

Conclusion. State support and implementation of programs for the development of the agricultural sector have allowed domestic producers to gain certain competitive advantages in the world agricultural market. There is a large-scale trans-

formation of crop production into a high-tech and knowledge-intensive industry. The Bryansk region demonstrates high achievements in the agricultural sector, it provides high-quality products to the population of the region, Russian and foreign markets. Precision farming, rational use of natural resources are being introduced in farms, and "smart" agricultural machinery is being used. Staffing problems are being successfully solved at the regional level. For the further development of the regional crop production, it is necessary to accelerate the digital modernization of the agrarian sector by increasing resource availability, to develop infrastructure, systems of additional professional education and self-education, to improve the image of rural work, and to increase the level of entrepreneurial culture.

Keywords: Bryansk region; crop production; innovations; seed production; "digital" agronomists

For citation. *Pogonyshev, V. A., Torikov, V. E., Pogonysheva, D. A., & Kovalev, Ya. S. (2025). Issues of improving crop production in digital agriculture*. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(4), 524-542. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-4-1496

Научная статья

ВОПРОСЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВА ПРОДУКЦИИ РАСТЕНИЕВОДСТВА В ЦИФРОВОМ СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ

В.А. Погонышев, В.Е. Ториков,
Д.А. Погонышева, Я.С. Ковалев

Аннотация

Обоснование. Аграрный бизнес обеспечивает продовольственную безопасность страны, создает условия для формирования трудового и поселенческого потенциала. Ключевой отраслью выступает растениеводство.

Цель. Изучить состояние растениеводства в Брянской области.

Материалы и методы. Материалы и методы исследования представляют собой аналитический обзор агроинноваций в растениеводстве, опирающихся на научно-технические достижения.

Результаты. Показано, что регион по производству картофеля и зерновых входит в число лидеров, растет число рентабельных организаций, применяющих ресурсосберегающие технологии. Отмечены особенности трансформа-

ции растениеводства в высокотехнологичную и наукоемкую сферу. Показано влияние настроек комбайна на травмированность семян. Установлено, что крупные и средние организации используют цифровые агроинновации, «умную» сельхозтехнику. Выявлены проблемы в кадровом обеспечении агроформирований. Рассмотрены пути их решения. Проанализированы требования современного растениеводства к «цифровым» агрономам. Показана необходимость дальнейшего сотрудничества государства, бизнеса, аграрной науки и образования.

Заключение. Государственная поддержка и реализация ряда программ по развитию аграрной отрасли позволили отечественным товаропроизводителям приобрести определенные конкурентные преимущества на мировом аграрном рынке. Происходит масштабное преобразование растениеводства в высокотехнологичную и наукоемкую отрасль. Брянская область демонстрирует высокие достижения в аграрной сфере, обеспечивает высококачественной продукцией население области, российский и внешние рынки. В хозяйствах внедряются точное земледелие, рациональное природопользование, используется «умная» сельхозтехника. Проблемы кадрового обеспечения успешно решаются на региональном уровне. Для дальнейшего развития регионального растениеводства необходимо ускорить цифровую модернизацию отрасли на основе повышения ресурсообеспеченности, развития инфраструктуры, системы дополнительного профессионального образования и самообразования, улучшения имиджа работы на селе, роста уровня предпринимательской культуры.

Ключевые слова: Брянская область; растениеводство; инновации; семеноводство; «цифровые» агрономы

Для цитирования. *Погонышев, В. А., Ториков, В. Е., Погонышева, Д. А., & Ковалев, Я. С. (2025). Вопросы совершенствования производства продукции растениеводства в цифровом сельском хозяйстве*. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(4), 524-542. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-4-1496

Introduction

In the conditions of technological advancements the paradigm of sustainable agricultural development is focused on ensuring food security, enhancing the competitiveness of the farming industry, and improving of the population well-being. The agribusiness ensures the country's food security, creates conditions for forming labour and demographic potential. The key industry is crop production. Achievements in the crop production of the country are supported by the government due to investment projects, digital solutions, by application

of science-based technologies and precision farming systems, export-oriented production, and adaptation to changing conditions.

Today the decision-making in crop production is one of the key issues in agricultural science and practice as in digital farming numerous factors are taken into consideration simultaneously. These factors are multidimensional and polystructural; they cover various seasonally and weather adjusted periods; they are multivariant due to a great number of stochastic parameters and indicators; they involve multiple business processes consisting of stages and phases breaking up into separate operations, etc. In global challenges, introducing a new model of economic behaviour of agricultural enterprises, digital platforms serve as an effective tool to support crop producers. Currently, the world's organic farmland is about 75.0 million hectares, and in 2020 the global organic food market reached 120.6 billion euros.

According to the Federal State Statistics Service, the share of the people employed in the agricultural sector is more than 5.5%. In 2022 the labour productivity index amounted to about 108.0%, and the number of profit-making organizations is still growing. The digital transformation of the agricultural sector causes the problems in staff resources. In the context of digitalization of crop production, personnel with digital competencies are a key asset.

Materials and methods

The materials and methods of the study present an analytical review of agricultural innovations in crop production based on scientific and technical achievements.

Results

Agro-industrial complex is a geographically distributed, heterogeneous, probabilistic and dynamic system of controlled and uncontrolled factors with interacting animate and inanimate objects. In conditions of digitalization business is becoming science-intensive and high-technology; however, there is a risk and some uncertainties about implementing business processes. The growth of the agrarian sector has led to loss of biodiversity, depletion of natural resources, and spread of pests and pathogens. About 40% of the world's lands are recognized as degraded. [1; 5 - 9].

The Russian leading scholars (A. Petrikov, I. Ushachev, L. Bondarenko, B. Lukyanov, et al) have thoroughly and consistently studied the dependence of employment and income of rural people on the level of science intensity and technological efficiency of the agricultural sector. According to the Federal

State Statistics Service, for the year 2022 the digitalization of the country's economy has increased the number of high-performance workplaces by more than 250 thousand, and by almost 70 thousand in the agricultural sector. Correspondingly, this indicator has risen in the Central Federal District, and in the Bryansk region (Fig. 1).

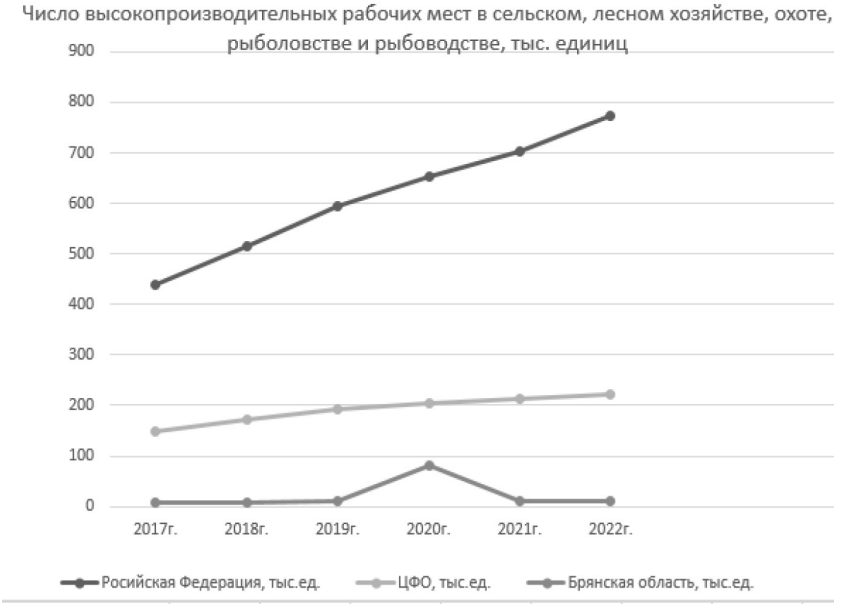


Fig. 1. Dynamics of high-performance workplaces in the agricultural sector (compiled by the authors)

About 10% of arable lands in the world belong to Russia, while up to 40% of the lands are in the zone of risky farming. In 2023 the country became the leader in exports of wheat, peas, and barley; took second place in exports of sunflower oil; earned about $44 billion, and by 2030 exports may grow to $55 billion. New markets are appearing in Asia and Africa. It is planned to put into use about 44 million hectares of underutilized agricultural lands, including 20 million hectares of arable ones. [2-4; 11-13; 16; 17; 20]

Crop production, providing economic and food security, forms the agrifood market, labour and demographic potential. The crop sector applies satellite communication and positioning systems, the Internet of things, digital twins, machine learning and computer vision, agrodrons, big data, etc. Digital solu-

tions make it possible to create a digital model of the agricultural landscape, to obtain soil characteristics, to monitor the crops, to predict crop yields, to control the performance quality of agricultural machinery, and to plan agrotechnical measures.

Farmers need analytical systems that include advanced analytics and intellectual data analysis. According to expert estimates, digitalization of the agrarian sector will result in reducing product losses up to 40%. The Ministry of Digital Development, Communications and Mass Media has ranged the regions by the level of digital maturity dividing them into three groups: high, medium, and low. Moscow, St. Petersburg and a number of regions are obviously on the top. Sixty-two regions are of a medium level of "digital maturity", including the Bryansk region. Fourteen regions have got a low level.

Precision agriculture appears to be a promising trend in crop production. In Russia it is provided by domestic designers of navigation equipment and software. In the country about 10-15% of agricultural enterprises use elements of precision farming in crop production. The Lipetsk, Samara and Oryol regions take the leading positions.

The Bryansk region has unique natural conditions for the cultivation of field crops. Arable lands are sandy loam with the humus content not exceeding 3.6%. Agricultural enterprises make use of more than 1 870 thousand hectares of farmland with the sown area of about 850 thousand hectares. Annually, more than 30 thousand hectares of bushy and forest-covered lands are put into use. There are about 600 agricultural companies in the agrarian sector.

The region provides both the regional population and the Russian and foreign markets with high-quality products. Agriculture accounts up to 30% of the gross regional product. Agricultural enterprises cultivate more than 80% of the acreage, peasant (private) farms – about 17%. In the country grain crops (wheat, grain corn, oats, barley, rye) and leguminous crops occupy about 32%, forage and industrial crops – about 42% and 19%, respectively.

Potatoes occupy more than 46 thousand hectares and are cultivated mainly in the Starodub and Pogar districts. In 2022 the grain yield was about 5 500 kg (weight after processing). The region is among the top five in the country in grain yield. In 2023 the Bryansk region was the leader in gross yield of potato with a share of more than 15% in the total volume. The horticulture industry is dynamically developing. In 2023 in all farms the area of fruit and berry plantations amounted to more than 2,600 ha. Over 3 thousand tons of fruit and berry have been collected there [14; 15; 18; 19]. Peasant (private) farms have high achievements (Fig. 2).



Fig. 2. Dynamics of agricultural production (compiled by the authors)

Resource-saving technologies are being introduced in the region, with their share in grain production exceeding 90%, in potato growing being about 40%. Further increase in potatoes, grains, and vegetables production is interconnected with solving the task of ensuring their storage. The construction and modernization of storage facilities are priority guidelines in the development of these sectors.

Speaking about the achievements in the regional agro-industrial complex, and crop production in particular, a decrease in both the population of the region and rural residents should be noted. Economic entities meet staffing issues caused by the unfavorable age distribution of the population (Fig. 3).

The analysis of the regional labour market reveals a concernment of the growing number of business organizations capable of solving problems of food security and reducing the human impact on the environment. However, the supply of specialists and managers in agriculture does not exceed 90%. Agricultural enterprises are facing staff shortage, as in the region there are not enough agronomists, mechanical engineers, etc. In the struggle for talents, farmers use cloud technologies and services, job sites, social networks, online tools, etc.

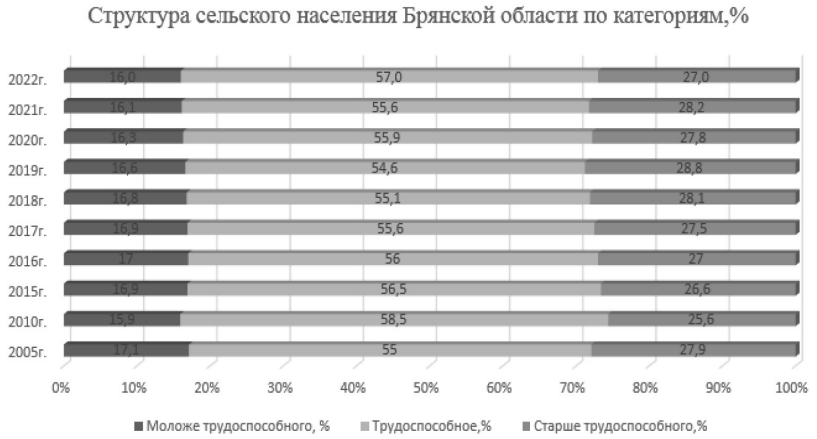


Fig. 3. Age structure of the rural population of the Bryansk region, % (compiled by the authors)

The availability of agricultural machinery, its energy capacity and technical condition significantly affect the technological level of crop production. Currently, the agricultural machinery park in the Bryansk region does not fully meet modern requirements. For example, in 2020-2022 the number of tractors decreased by 184 units, the number of combine harvesters lessened by 52 units, the wear rate of agricultural machinery was more than 40%. The energy capacity per 100 ha of crops is decreasing. It should be noted that in the country, in the context of technical modernization of the agricultural business, it is planned to bring the number of high-performance combine harvesters up to 240-260 thousand units with their total engine power of about 60 mln hp. Sales of four-wheel drive tractors have increased by almost 23%, and combine harvesters by 4%. It is expected to produce fifth-generation equipment with energy-saving technologies and a well-developed engineering block equipped with automation systems and controlled via intelligent decision making. By the year 2035 the share of domestic agricultural machinery should have increased from 61% to 80% (2022) [10]. Cognitive Pilot is one of the Russian suppliers of autopilots based on artificial intelligence. By the beginning of 2022 the Cognitive Agro Pilot smart system was used in more than 30 regions of Russia.

One of the global trends in crop production appears to be biologization, ensuring the sustainability of the agroecosystem and being gradually implemented in Russia and in the Bryansk region. Biological or organic farming is based

on differentiated application of soil management techniques, strict adherence to scientifically based crop rotation with legume crops as green manure or siderates, mainly organic fertilization with minerals applied for a deficiency-free humus balance, and reproduction of soil fertility. The application of organic farming systems requires high technological discipline and professional staff.

Seed production is a key part of crop production. Russian farmers annually spend more than 200 billion rubles on seeds. Currently, domestic seed supply of Russia is at the level of 55-60% with the required minimum of 75% or more by the year 2030. Withdrawal from the market of foreign products provides new opportunities for agricultural enterprises. LLC Krasny Oktyabr, being an elite grain crops seed-production farm, is a vivid an example in the Bryansk region.

The genotype potential productivity largely depends on the qualitative characteristics of the seed material, having a prolonged effect on the development of cultivated plants. The use of agrotechnological techniques and technical solutions to improve them is an urgent task in crop production. Currently, the working bodies of combines, various loading facilities and other machines dealing with seeds mechanically damage them to a greater or lesser degree (macro- and microdamage). In the threshing unit grain is damaged most. Many microdamages, not affecting the laboratory seed germination, can worsen field germination and crop productivity. The main factors determining the degree of seed damage are the operating regime of a combine, the correct adjustment of its working bodies, taking into account the physical and mechanical properties of the threshed crops. The value of the rotation speed, or the frequency of drum rotation, is of primary importance in reducing seed damages while threshing. According to the Central Machine Testing Station, the total number of injured wheat seeds decreases by more than 2 times when the rotation speed of the combine drum is reduced from 1200 to 900 rpm. Lowering the rotation speed of the drum from 1020 to 850 rpm reduces the number of rye grains with a completely knocked out and partially beaten embryo from 12.6 to 5.2%, and of wheat grains from 2.2% to zero. When harvesting grain seed crops it is recommended to reduce the rotating speed of the drum to 900 rpm, and in case of minor returns up to 800 rpm. The dependence of seed damage on the rotation drum speed even more appears when threshing grain legumes. In order not to damage the seeds, the combine concave clearances both at the inlet and at the outlet should be the largest, but do not allow returns. At the optimum rotation drum speed combine concave clearances are 16-18 mm at the inlet and 4-6 mm at the outlet. When harvesting highly moist plants, combine concave clearances are reduced, and when harvesting dry and easily threshed crops, they are increased. Increasing or

decreasing the mown mass supply without changing the technological adjustments of the threshing device increases the damage of the seeds. When there is less mown mass, the working organs have a greater effect on the seeds, as the protective effect of the plant mass decreases. At the same time the supply of the mown mass greater than in setting for a certain model of the combine increases the damage of seeds due to overfilling of the combine concave clearances and a decrease in their concave separation. The damage of seeds is affected by the adjustment of cleaning sieves, malfunction of augers and elevators and other parts of the threshing machine. When there are sharp edges and protrusions on the working organs of the threshing machine seed damage increases.

A double-drum thresher takes a special place in improving the quality of threshing. It was offered by the founder of agricultural mechanics, academician V. P. Goryachkin. The existing threshing technology and threshing machines are designed to grind seeds tightly connected to the plant. As a result, the ripest seeds get overstressed. In combines with a double-drum thresher, the seeds threshed by the first drum with a reduced rotation speed are allocated to the sieves, and the half-threshed ones come into the second drum, where it is threshed at the maximum required rotation speed. Thus, the use of double-drum threshers allows adjusting the combine operating according to the physico-mechanical properties of seeds and plants, reducing seed damage and losses due to under-threshing. The advantages of double-drum threshers appear only if the rotation speed of the first drum is 200-300 rpm less than the second, and the combine concave clearances are 3-4 mm larger in the first drum as compared to the second one. Hence, there are many ways to reduce seed damage. But first of all, it is necessary to choose the right mode of combine operation depending on the condition, physical and mechanical properties of the harvested crop and variety. It is very important to ensure the proper technical condition of the machines.

The researchers note that in modern crop production multifunctional competitive employees are in demand, they should be capable of making multicriterion decisions based on processing asymmetric flows of big data, working in conditions of multitasking, uncertainty and risks. High yields of cultivated crops in the “digital” field are due to mutually beneficial cooperation with worldwide suppliers of fertilizers, seeds, agricultural machinery, “smart” machines, and service providers.

Flows of structured and unstructured information distort the assessment of production situations. The “digital” agronomist performs data processing using software tools based on a multidimensional analysis of the results of informa-

tion processing. Cognitive flexibility, emotional intelligence, lean manufacturing, project and process management are professionally important qualities of a modern agronomist who is able to use online tools, digital platforms and services. According to expert appraisal, during one season the farmer makes more than forty decisions in limited time in the interaction of controlled and uncontrolled, subjective and objective factors. Structured and unstructured data can cause misrepresentation of production situations. Due to the high information noisiness of business processes, the ability to promptly make reasoned decision is a valuable professional quality. High level of thinking flexibility is a professionally important quality of a "digital" agronomist, a pre-requisite for the well-being of an agricultural organization in the digital space. In addition, the ability to work with digital equipment can significantly reduce production costs for technological operations.

In the digital space information resources are big data having the properties of variability, high dynamics, scale, multidimensionality, and asymmetry. Turbulence and uncertainty in digital agriculture, the implementation of algorithmic and creative ways to manage problematic situations necessitate adequate preparation of future specialists, the formation of entrepreneurial competencies.

In the digital educational space of the Bryansk State Agrarian University fragments of "digital" activity, its subject-technological and socio-role content are modeled in the conditions of quasi-professional activity of students. The directors and specialists of the best agricultural companies participate in the educational process. They hold masterclasses. Students undergo internships on the basis of the leading enterprises of the region. The implementation of vocational training at the University as mobile business entities in the agricultural sector is sure to provide the labour market with competitive specialists.

The Open Agrarian University "Land of Knowledge", developed in Russia, acts as an educational platform providing farmers with access to an applied knowledge database. Experts from 23 agricultural universities and 4 research institutes offer their services via distance education.

There is a Farmer's School and an Agro-Industrial Complex Competence Center in the Bryansk region. Regional programs "AgroStartUp" as projects to hold staff in the farms are being implemented. The regional educational and methodological information and consulting center for rural producers operates on the basis of the Bryansk State Agrarian University.

Digitalization of agriculture, transferring business processes to the online environment, at the same time reducing the cost of transactions, reveals promis-

ing sources of income to market entities, significantly faster launching products and services in digital format for successful entry into local and global markets. In 2023 the level of digitalization of the Russian agro-industrial complex was 20-25% as estimated by the experts. In 2024 the growth rate of digitalization may reach 40-50%, due to stimulating companies through the government subsidies as well.

It should be noted that during the period of 2020-2022 the number of organizations using information and communication technologies is still small in the region. There is a decrease in the number of users of Internet resources, but at the same time the websites of agricultural enterprises have become more (from 19 to 24). The number of personal computers per 100 employees is increasing, and now it is equal to 19. An increase in the cost of purchasing modern hardware and software products from 35 to 90 mln rubles can be referred to positive trends.

The factors hindering the formation of "digital" employees in crop production include the lack of sound personnel policy in organizations, the support for rural youth and youth entrepreneurship, digital inequality, the lack of high-speed Internet connection, digital platforms as a service, the lack of modern infrastructure and financial resources, etc.

Conclusion

To sum up the results obtained, it should be noted that the cooperation of the state, business, science and education results in sustainable development of rural areas of the country. State support and implementation of programs for the development of the agricultural sector have allowed domestic producers to gain certain competitive advantages in the world agricultural market. There is a large-scale transformation of crop production into a high-tech and knowledge-intensive industry.

The Bryansk region demonstrates high achievements in the agricultural sector, it provides high-quality products to the population of the region, Russian and foreign markets. Precision farming, rational use of natural resources are being introduced in farms, and "smart" agricultural machinery is being used. Staffing problems are being successfully solved at the regional level.

For the further development of the regional crop production, it is necessary to accelerate the digital modernization of the agrarian sector by increasing resource availability, to develop infrastructure, systems of additional professional education and self-education, to improve the image of rural work, and to increase the level of entrepreneurial culture.

References

1. Amirova, E. F., Gavril'eva, N. K., Romanishina, T. S., & Asfandiiarova, R. A. (2022). On the problem of developing "sustainable" agriculture in modern economic realities. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *14*(3), 392–406. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2022-14-3-392-406. EDN: https://elibrary.ru/SYNDUR
2. Bykov, A. A., Aleshchenko, V. V., Chupin, R. I., Popova, E. V., & Kumratova, A. M. (2022). Features of the formation and development of grain production and marketing in Siberia. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *14*(3), 326–341. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2022-14-3-326-341. EDN: https://elibrary.ru/UTSKZQ
3. Butakova, M. M., Sokolova, O. N., & Churina, L. I. (2022). Export of Russian agro-industrial complex products: new opportunities and development challenges. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *14*(3), 342–354. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2022-14-3-342-354. EDN: https://elibrary.ru/SDUJCQ
4. Vasiliev, A. S., & Farinyuk, Yu. T. (2022). Improving the efficiency of oat cultivation technologies in the Central Non-Chernozem region of Russia. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *14*(4), 384–402. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2022-14-4-384-402. EDN: https://elibrary.ru/CAXHCH
5. Golovina, S. G., Poltarykhin, A. L., Zhuravlev, P. V., & Mikolaychik, I. V. (2022). Rural population income — a condition for human capital formation in rural areas. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *14*(1), 83–102. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2022-14-1-83-102. EDN: https://elibrary.ru/CBTCGC
6. Federal State Statistics Service. Retrieved from: https://www.gks.ru
7. Tatarintsev, V. L., Lisovskaya, Yu. S., & Tatarintsev, L. M. (2022). Protection of agricultural lands as the basis for sustainable land management in the arid steppes of the Altai Krai. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *14*(2), 338–355. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2022-14-2-338-355. EDN: https://elibrary.ru/POBDIO
8. Fedorenko, V. F., Chernoivanov, V. I., Gol'tyapin, V. Ya., & Fedorenko, I. V. (2018). *Global trends in the intellectualization of agriculture: scientific analytical review*. Moscow: FSBSI "Rosinformagrotech". 232 pp. ISBN 978-5-7367-1434-6. EDN: https://elibrary.ru/XZVBVZ
9. FSBSI "Rosinformagrotech". Retrieved from: https://rosinformagrotech.ru/index.php?option=com_attachments&task=download&id=222
10. Svyatova, O. V., et al. (2021). Export as a stage of further implementation of the import substitution policy. *International Agricultural Journal*, *(5)*, 41–45.

https://doi.org/10.24412/2587-6740-2021-5-41-45. EDN: https://elibrary.ru/TEGXAD

11. Ableeva, A., Salimova, G., Lubova, T., Farrahetdinova, A., & Siraeva, R. (2022). Evaluation of the efficiency of fixed assets of economic sectors based on index analysis. *Journal of Management Analytics*, *9*(3), 369–382. https://econpapers.repec.org/article/taftjmaxx/v_3a9_3ay_3a2022_3ai_3a3_3ap_3a369-382.htm. https://doi.org/10.1080/23270012.2022.2113160. EDN: https://elibrary.ru/OOCPXA
12. Aleinik, S. N., et al. (2020). Agriculture development in the context of technological and ecology problems. *Journal of Critical Reviews*, *7*(9), 2174–2182. https://doi.org/10.31838/jcr.07.09.356. EDN: https://elibrary.ru/MPLEQP
13. Latysheva, Z., Skripkina, E., Kopteva, N., Zhilyakov, D., & Nikiforov, A. (2020). Improving the state regulatory system of the agribusiness. *Cuestiones Políticas*, *37*(65), 116–126. https://produccioncientificaluz.org/index.php/cuestiones/article/view/33297. https://doi.org/10.46398/cuestpol.3865.09. EDN: https://elibrary.ru/KUIKHG
14. Lozovaya, O., Martynushkin, A., & Polyakov, M. (2023). Improving business process management at a small agribusiness enterprise. *E3S Web of Conferences. Ural Environmental Science Forum «Sustainable Development of Industrial Region» (UESF-2023)*, Chelyabinsk, 2023, 03107. https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2023/26/e3sconf_uesf2023_03107/e3sconf_uesf2023_03107.html. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202338903107
15. Pogonyshev, V., Torikov, V., Mokshin, I., & Pogonysheva, D. (2021). Resource economy in agriculture. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Mechanization, Engineering, Technology, Innovation and Digital Technologies in Agriculture*, *3*, 032035. https://doi.org/10.1088/1755-1315/723/3/032035
16. Pogonyshev, V., Torikov, V., Pogonysheva, D., Seraya, G., & Khvostenko, T. (2022). Digitalization issues of the agri-industrial complex. *Improving Energy Efficiency, Environmental Safety and Sustainable Development in Agriculture. International Scientific and Practical Conference*, London, 2022, 012024. https://doi.org/10.1088/1755-1315/979/1/012024
17. Proka, N., Gulyaeva, T., Savkin, V., Kalinicheva, E., & Buraeva, E. (2021). Assessment of labor incentive policy in the agro-industrial complex. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, 022020. https://doi.org/10.1088/1755-1315/677/2/022020. EDN: https://elibrary.ru/JNGVAM
18. Singh, G., Kalra, N., Yadav, N., Sharma, A., & Saini, M. (2022). Smart agriculture: a review. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *14*(6), 423–

454. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2022-14-6-423-454. EDN: https://elibrary.ru/FFRZZA

19. Torikov, V., Pogonyshev, V., Pogonysheva, D., Ivanova, N., & Bychkova, T. (2023). Issues of digital transformation of biological agriculture in the south-west of the central region of Russia. *II International Conference on Current Issues of Breeding, Technology and Processing of Agricultural Crops, and Environment (CIBTA-II-2023)*, Les Ulis Cedex A, France, 2023, 1018. https://doi.org/10.1051/bioconf/20237101018. EDN: https://elibrary.ru/IXDOQS
20. Torikov, V., Pogonyshev, V., Pogonysheva, D., Ivanova, N., & Bychkova, T. (2023). Issues of digital transformation of agriculture. *AIP Conference Proceedings. International Scientific and Practical Conference «Innovative Technologies in Agriculture»*, *2921*(1), 080001. AIP Publishing, 2023. https://doi.org/10.1063/5.0165005
21. Zyukin, D., Zhilyakov, D., Bolokhontseva, Y., & Petrushina, O. (2020). Export of Russian grain: prospects and the role of the state in its development. *Amazonia Investiga*, *9*(28), 320. Retrieved from: https://amazoniainvestiga.info/index.php/amazonia/article/view/1327. https://doi.org/10.34069/AI/2020.28.04.36. EDN: https://elibrary.ru/TKNHCB

Список литературы

1. Амирова, Е. Ф., Гаврильева, Н. К., Романишина, Т. С., & Асфандиярова, Р. А. (2022). К проблеме развития «устойчивого» сельского хозяйства в современных экономических реалиях. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *14*(3), 392–406. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2022-14-3-392-406. EDN: https://elibrary.ru/SYNDUR
2. Быков, А. А., Алещенко, В. В., Чупин, Р. И., Попова, Е. В., & Кумратова, А. М. (2022). Особенности формирования и развития производства и сбыта зерна в Сибири. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *14*(3), 326–341. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2022-14-3-326-341. EDN: https://elibrary.ru/UTSKZQ
3. Бутакова, М. М., Соколова, О. Н., & Чурина, Л. И. (2022). Экспорт продукции агропромышленного комплекса России: новые возможности и проблемы развития. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *14*(3), 342–354. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2022-14-3-342-354. EDN: https://elibrary.ru/SDUJCQ
4. Васильев, А. С., & Фаринюк, Ю. Т. (2022). Повышение эффективности технологий возделывания овса в Центральном Нечерноземье России. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *14*(4), 384–402. https://

doi.org/10.12731/2658-6649-2022-14-4-384-402. EDN: https://elibrary.ru/CAXHCH

5. Головина, С. Г., Полтарыхин, А. Л., Журавлёв, П. В., & Миколайчик, И. В. (2022). Доходы сельского населения — условие формирования человеческого капитала в сельской местности. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *14*(1), 83–102. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2022-14-1-83-102. EDN: https://elibrary.ru/CBTCGC
6. Федеральная служба государственной статистики. https://www.gks.ru
7. Татаринцев, В. Л., Лисовская, Ю. С., & Татаринцев, Л. М. (2022). Охрана земель сельскохозяйственного назначения как основа устойчивого управления землепользованием в засушливых степях Алтайского края. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *14*(2), 338–355. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2022-14-2-338-355. EDN: https://elibrary.ru/POBDIO
8. Федоренко, В. Ф., Черноиванов, В. И., Гольтяпин, В. Я., & Федоренко, И. В. (2018). *Мировые тенденции интеллектуализации сельского хозяйства*: научный аналитический обзор. Москва: ФГБНУ «Росинформагротех», 232 с. ISBN 978-5-7367-1434-6. EDN: https://elibrary.ru/XZVBVZ
9. ФГБНУ «Росинформагротех». https://rosinformagrotech.ru/index.php?option=com_attachments&task=download&id=222
10. Святова, О. В., и др. (2021). Экспорт как этап дальнейшей реализации политики импортозамещения. *Международный сельскохозяйственный журнал*, (5), 41–45. https://doi.org/10.24412/2587-6740-2021-5-41-45. EDN: https://elibrary.ru/TEGXAD
11. Ableeva, A., Salimova, G., Lubova, T., Farrahetdinova, A., & Siraeva, R. (2022). Evaluation of the efficiency of fixed assets of economic sectors based on index analysis. *Journal of Management Analytics*, *9*(3), 369–382. https://econpapers.repec.org/article/taftjmaxx/v_3a9_3ay_3a2022_3ai_3a3_3ap_3a369-382.htm. https://doi.org/10.1080/23270012.2022.2113160. EDN: https://elibrary.ru/OOCPXA
12. Aleinik, S. N., et al. (2020). Agriculture development in the context of technological and ecology problems. *Journal of Critical Reviews*, *7*(9), 2174–2182. https://doi.org/10.31838/jcr.07.09.356. EDN: https://elibrary.ru/MPLEQP
13. Latysheva, Z., Skripkina, E., Kopteva, N., Zhilyakov, D., & Nikiforov, A. (2020). Improving the state regulatory system of the agribusiness. *Cuestiones Políticas*, *37*(65), 116–126. https://produccioncientificaluz.org/index.php/cuestiones/article/view/33297. https://doi.org/10.46398/cuestpol.3865.09. EDN: https://elibrary.ru/KUIKHG

14. Lozovaya, O., Martynushkin, A., & Polyakov, M. (2023). Improving business process management at a small agribusiness enterprise. *E3S Web of Conferences. Ural Environmental Science Forum «Sustainable Development of Industrial Region» (UESF-2023)*, Chelyabinsk, 2023, 03107. https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2023/26/e3sconf_uesf2023_03107/e3sconf_uesf2023_03107.html. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202338903107
15. Pogonyshev, V., Torikov, V., Mokshin, I., & Pogonysheva, D. (2021). Resource economy in agriculture. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Mechanization, Engineering, Technology, Innovation and Digital Technologies in Agriculture*, *3*, 032035. https://doi.org/10.1088/1755-1315/723/3/032035
16. Pogonyshev, V., Torikov, V., Pogonysheva, D., Seraya, G., & Khvostenko, T. (2022). Digitalization issues of the agri-industrial complex. *Improving Energy Efficiency, Environmental Safety and Sustainable Development in Agriculture. International Scientific and Practical Conference*, London, 2022, 012024. https://doi.org/10.1088/1755-1315/979/1/012024
17. Proka, N., Gulyaeva, T., Savkin, V., Kalinicheva, E., & Buraeva, E. (2021). Assessment of labor incentive policy in the agro-industrial complex. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, 022020. https://doi.org/10.1088/1755-1315/677/2/022020. EDN: https://elibrary.ru/JNGVAM
18. Singh, G., Kalra, N., Yadav, N., Sharma, A., & Saini, M. (2022). Smart agriculture: a review. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *14*(6), 423–454. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2022-14-6-423-454. EDN: https://elibrary.ru/FFRZZA
19. Torikov, V., Pogonyshev, V., Pogonysheva, D., Ivanova, N., & Bychkova, T. (2023). Issues of digital transformation of biological agriculture in the south-west of the central region of Russia. *II International Conference on Current Issues of Breeding, Technology and Processing of Agricultural Crops, and Environment (CIBTA-II-2023)*, Les Ulis Cedex A, France, 2023, 1018. https://doi.org/10.1051/bioconf/20237101018. EDN: https://elibrary.ru/IXDOQS
20. Torikov, V., Pogonyshev, V., Pogonysheva, D., Ivanova, N., & Bychkova, T. (2023). Issues of digital transformation of agriculture. *AIP Conference Proceedings. International Scientific and Practical Conference «Innovative Technologies in Agriculture»*, *2921*(1), 080001. AIP Publishing, 2023. https://doi.org/10.1063/5.0165005
21. Zyukin, D., Zhilyakov, D., Bolokhontseva, Y., & Petrushina, O. (2020). Export of Russian grain: prospects and the role of the state in its development. *Amazonia Investiga*, *9*(28), 320. Retrieved from: https://amazoniainvestiga.info/index.

php/amazonia/article/view/1327. https://doi.org/10.34069/AI/2020.28.04.36. EDN: https://elibrary.ru/TKNHCB

DATA ABOUT THE AUTHORS

Vladimir A. Pogonyshev, Professor of the Department of Automation, Physics and Mathematics, Doctor of Technical Sciences, Professor
Bryansk State Agrarian University
2a, Sovetskaya Str., Kokino, Vygonichy District, Bryansk Region, 243365, Russian Federation
pog@bgsha.com
SPIN-code: 5923-1754

Vladimir E. Torikov, Professor of the Department of Agronomy, Breeding and Seed Production, Doctor of Agricultural Sciences, Professor
Bryansk State Agrarian University
2a, Sovetskaya Str., Kokino, Vygonichy District, Bryansk Region, 243365, Russian Federation
torikov@bgsha.com
SPIN-code: 2202-5597

Dina A. Pogonysheva, Professor of the Department of Informatics, Information Systems and Technologies, Doctor of Pedagogical Sciences, Associate Professor
Bryansk State Agrarian University
2a, Sovetskaya Str., Kokino, Vygonichy District, Bryansk Region, 243365, Russian Federation
dpogonysheva32@mail.ru
SPIN-code: 6861-6648

Yaroslav S. Kovalev, student
Bryansk State Agrarian University
2a, Sovetskaya Str., Kokino, Vygonichy District, Bryansk Region, 243365, Russian Federation
parik-legenda2001@yandex.ru

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Погонышев Владимир Анатольевич, профессор кафедры автоматики, физики и математики, доктор технических наук, профессор

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Брянский государственный аграрный университет»
ул. Советская, 2а, с. Кокино, Выгоничский район, Брянская область, 243365, Российская Федерация
pog@bgsha.com

Ториков Владимир Ефимович, профессор кафедры агрономии, селекции и семеноводства, доктор сельскохозяйственных наук, профессор
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Брянский государственный аграрный университет»
ул. Советская, 2а, с. Кокино, Выгоничский район, Брянская область, 243365, Российская Федерация
torikov@bgsha.com

Погонышева Дина Алексеевна, профессор кафедры информатики, информационных систем и технологий, доктор педагогических наук, доцент
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Брянский государственный аграрный университет»
ул. Советская, 2а, с. Кокино, Выгоничский район, Брянская область, 243365, Российская Федерация
dpogonysheva32@mail.ru

Ковалев Ярослав Сергеевич, студент
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Брянский государственный аграрный университет»
ул. Советская, 2а, с. Кокино, Выгоничский район, Брянская область, 243365, Российская Федерация
parik-legenda2001@yandex.ru

Поступила 08.11.2024 Received 08.11.2024
После рецензирования 17.12.2024 Revised 17.12.2024
Принята 24.12.2024 Accepted 24.12.2024

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-4-1497 **EDN: KGIMII**
УДК 576.895.342:639.3.091

CC BY NC ND

Научная статья

ПАРАЗИТОФАУНА РЫБ ВОДОЕМОВ СЕВЕРО-ВОСТОКА АРМЕНИИ

Р.Л. Оганесян, О.В.Щербаков, С.А. Акопян, Дж.А. Мкртчян, М.Я. Рухкян

Аннотация

Обоснование. Инвазионные болезни рыб наносят ощутимый ущерб рыбному хозяйству и являются существенным фактором, влияющим на жизнеспособность рыб. Северо-восточный регион Армении (бассейн озера Севан и долина реки Агстев) является одним из важнейших рекреационных центров страны. Экосистемы указанного региона в значительной мере подвергаются антропопрессии. С этой точки зрения изучение биоразнообразия, в том числе паразитоценоза как одного из основных биоиндикаторов последствий воздействия антропогенного фактора в указанном регионе имеет важное значение. При этом следует отметить, что паразитофауна рыб реки Агстев до настоящего времени остается практически не изученной.

Цель. Исследование паразитофауны рыб водоемов северо-восточной части Армении - бассейна озера Севан и реки Агстев с притоком Гетик.

Материалы и методы. Обследовано 150 особей 9 видов рыб: серебряного карася, храмули, восточной быстрянки, севанского и куринского усачей, сига, куринского гольца, куринской уклейки и золотистой щиповки. Исследования рыб проводили в Научном центре зоологии и гидроэкологии по общепринятой методике паразитологических вскрытий. Статистическую обработку результатов проводили с помощью компьютерной программы BioStat 2009.

Результаты. У обследованных рыб выявлено 12 видов паразитов. Суммарная зараженность рыб водоемов северо-восточной Армении паразитами составляет 63,3%. В наибольшей степени рыбы оказались зараженными метацеркариями диплостом (42%), дактилогирусами (6,67%) и нематодой *Rhabdochona fortunatowi* (6,67%), а также плероцеркоидами лигул (6,0%) и половозрелыми цестодами *Schyzocotyle acheilognathi* (6,0%). В наименьшей степени рыбы заражены гиродактилусами (0,67%) и трематодой *Allocreadium isosporum* (0,67%). Из обнаруженных паразитов наиболее патогенны для рыб

метацеркарии диплостом, поражающие хрусталик глаза, и плероцеркоиды лигул, паразитирующие в полости тела рыб. Наибольшее число видов паразитов установлено у храмуль (7 видов) и куринских усачей (6 видов).

Заключение. Паразитофауна рыб водоемов северо-востока Армении не отличается разнообразием. На формирование паразитофауны рыб бассейна реки Агстев наиболее сильное воздействие оказывает автохтонная паразитофауна рыб реки Кура, правым притоком которой является Агстев. В несколько меньшей степени оно обусловлено воздействием инвазивных видов паразитов, проникших в регион вместе с инвазивными и интродуцированными видами рыб, в том числе промысловыми.

Ключевые слова: паразитофауна рыб; видовой состав паразитов; экстенсивность инвазии; интенсивность инвазии; гельминты; паразитические простейшие

Для цитирования. Оганесян, Р. Л., Щербаков, О. В., Акопян, С. А., Мкртчян, Дж. А., & Рухкян, М. Я. (2025). Паразитофауна рыб водоемов северо-востока Армении. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(4), 543-576. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-4-1497

Original article

FAUNA OF FISH PARASITES IN WATER BODIES OF THE NORTH-EAST OF ARMENIA

R.L. Hovhannisyan, O.V. Shcherbakov, S.H. Hakobyan, J.A. Mkrtchyan, M.Ya. Rukhkyan

Abstract

Background. Fish parasitic diseases seriously damage fish farming, and significantly influence the fish viability. North-East region of Armenia (Sevan lake basin, and Aghstev river valley) are the most important recreation center of the country. Ecosystems of the mentioned region have been undergone antropopression signidicantly. Research of biodiversity including parasitocenoses as one of the main bioindicators of the results of anthropogenic factor`s influence in the mentioned region has an important significance from this point of view. At the same time, it should be noted that fauna of fish parasites in Aghstev river remains unexplored up to now.

Purpose. Research of fauna of fish parasites in water bodies of the North-East part of Armenia, namely Sevan lake basin, and Aghstev river with Getik tributary.

Materials and methods. 150 specimens of 9 fish species have been examined: silver Prussian carp, capoeta, Kura schneider, Sevan and Kura barbel, white fish, oxynoemacheilus, Kura bleak, and golden loach. Fish examination was performed at the Scientific Center of Zoology and Hydroecology, according to the certain methodology of the parasitological dissections. Statistical processing of the results was performed by means of BioStat 2009 software.

Results. 12 species of parasites were detected in the examined fishes. Fish parasite infection overall rate in water bodies of North-East Armenia was equal to 63.3%. Levels of fish infection with *Diplostomum* metacercariae (42%), *Dactylogyrus sp.* (6.67%), *Rhabdochona fortunatowi* (6.67%), as well as *Ligula* pleurocercoids (6.0%), and adult *Schyzocotyle acheilognathi* (6.0%) were maximal, while those with *Gyrodactylus spp.* (0.67%), and *Allocreadium isosporum* (0.67%) were minimal. The most pathogenic of the detected fish parasites were *Diplostomum* metacercariae infecting eye lens, and *Ligula* pleurocercoids located in the fish body cavity. Maximal number of the detected species of parasites has been registered in capoeta (7 species), and Kura barbel (6 species).

Conclusion. Fauna of fish paraistes in water bodies of North-East Armenia does not characterized by high diversity. Fauna of fish parasites in Aghstev river is influenced by the authochthonous parasite fauna of Kura river, the right tributary of which is the river Aghstev. To a somewhat lesser extent, it is determined by invasive species of parasites that entered the region with the invasive and introduced fish species, including commercially important ones.

Keywords: fauna of fish parasites; parasites species composition; extensiveness of invasion; intensity of invasion; helminthes; parasitic protozoa

For citation. Hovhannisyan, R. L., Shcherbakov, O. V., Hakobyan, S. H., Mkrtchyan, J. A., & Rukhkyan, M. Ya. (2025). Fauna of fish parasites in water bodies of the north-east of Armenia. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(4), 543-576. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-4-1497

Введение

В последнее время оценка паразитологической ситуации приобретает важное значение не только в искусственных, но и в естественных водоемах [51]. Ухудшающаяся экологическая обстановка в естественных водоемах приводит к снижению иммунитета рыб к инвазионным возбудителям, что создает благоприятные условия для распространения различных болезней [8].

Инвазионные болезни рыб наносят ощутимый ущерб рыбному хозяйству республики и являются существенным фактором, влияющим на жизнеспособность рыб. Наиболее патогенны те гельминты, для которых рыбы

являются вторыми промежуточными или дополнительными хозяевами: при гибели рыб, вызываемой личинками этих гельминтов, осуществляется их передача дефинитивным хозяевам [8; 20; 51].

При изучении водных экосистем состояние паразитофауны используется в качестве одного из самых чувствительных биоиндикаторов, поскольку наличие и обилие паразитических организмов у рыб может отражать благополучие водного сообщества в целом [67].

Разнообразие видового состава гидробионтов зависит от степени и характера воздействия тех или иных экологических факторов (естественных и антропогенных). В связи с антропогенными факторами (реконструкцией естественных водоемов, возрастающей хозяйственной деятельностью человека) происходят изменения не только в размножении, развитии гидробионтов и в приспособительных изменениях популяций, но и в ценозах – меняется их видовой состав, с преобладанием эврибионтных видов [22].

В состав ихтиофауны озера Севан входят эндемики: севанская форель (*Salmo ischchan* Kessler, 1877), храмуля (*Capoeta capoeta* Güldenstädt, 1773) и севанский усач (*Barbus goktschaicus* Kessler, 1877), а также виды-интродуценты: сиг (*Coregonus lavaretus* Linnaeus, 1758), акклиматизированный в озере в 1920-е годы, и серебряный карась (*Carassius auratus gibelio* Bloch, 1782), интродуцированный в озеро в начале 1980-х гг. В притоках озера обитают серебряный карась, севанский усач, ручьевая форель (*Salmo trutta* Linnaeus, 1758), севанская форель, восточная быстрянка (*Alburnoides eichwaldii* De Filippi, 1863), храмуля (*Capoea capoeta* Gueldenstaedt, 1773), амурский чебачок (*Pseudorasbora parva* Temminck et Schlegel, 1846) и некоторые другие [12-13].

Ихтиофауна р. Агстев представлена следующими видами: восточная быстрянка, храмуля, серебряный карась, куринский голец (*Oxynoemacheilus brandtii* Kessler, 1877), куринский усач (*Barbus cyri* De Filippi, 1865); куринская уклейка, или уклейка Филиппи (*Alburnus filippii* Kessler, 1877) и др. [54; 70].

В условиях возросшей антропопрессии в связи со стремительным развитием рыбных хозяйств в последние годы, а также наличием большого количества населенных пунктов, изучение паразитофауны рыб и особенностей ее формирования и распространения является актуальным и представляет научный и практический интерес. Кроме того, северо-восточный регион Армении (бассейн озера Севан и долина реки Агстев) является одним из важнейших рекреационных центров страны. Экосистемы указанного региона в значительной мере подвергаются антропопрессии. С

этой точки зрения изучение биоразнообразия данного региона приобретает важное значение. Не является исключением также исследование паразитоценоза – одного из основных биоиндикаторов последствий воздействия антропогенного фактора [25; 31; 67]. При этом следует отметить, что паразитофауна рыб реки Агстев до настоящего времени остается практически не изученной.

Целью работы явилось исследование паразитофауны рыб водоемов северо-восточной части Республики Армения: бассейна озера Севан, реки Агстев с ее главним притоком - Гетик, а также выявление инвазированности рыб паразитами. Задачами исследования явились: выявление видового состава паразитов рыб, изучение паразитологической ситуации, определение количественных характеристик инвазированности рыб паразитами, а также выявление опасных гельминтозов рыб.

Материал и методы исследования

Севан – древнее реликтовое озеро тектонико-запрудного происхождения, одно из крупнейших высокогорных олиготрофных озер, расположенное в северо-восточной части Армянского нагорья на высоте 1900,30 м над уровнем моря. Озеро Севан является крупнейшим пресноводным водоемом Кавказа и имеет важнейшее экономическое и рекреационное значение. Кроме того, рыбы, обитающие в озере, имеют важное промысловое значение [47].

Агстев является крупнейшей рекой северо-востока Армении, берущей начало на северо-западных склонах Памбакского хребта в районе горы Тежлер. Длина реки составляет 133 км, площадь бассейна – 2589 км^2. Река протекает в Лорийской и Тавушской областях, по территории сел Лермонтово, Маргаовит и Фиолетово, а также городов Дилижан и Иджеван. В верховьях р. Агстев – горная река, текущая в узком лесистом ущелье на северо-восток, ниже по течению приобретает более равнинный характер и протекает по более широкой долине (частично – по территории Азербайджана); является правым притоком Куры. Питание реки смешанного типа (за счет талых и дождевых вод, а также родников), половодье – с апреля по июнь, в отдельные годы наблюдаются интенсивные разливы, сопровождающиеся повреждением коммуникаций и построек. Воды реки используются с гидроэнергетическими и ирригационными целями.

Сбор материала проводили в 2023-2024 гг. Материалом исследований послужили собственные сборы паразитов рыб из следующих водоемов:

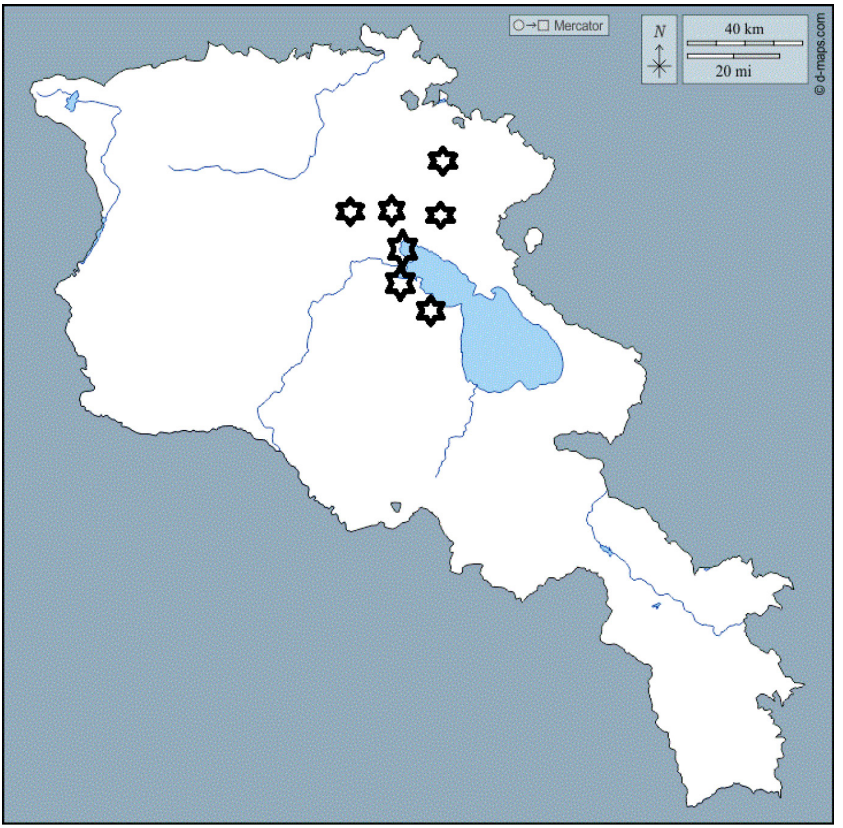
– река Агстев – близ населенных пунктов Фиолетово (40.722764^0 с.ш.; 44.715268^0 в.д.; 1684 м н.у.м.) и Лермонтово (40.752722^0 с.ш.; 44.640077^0

в.д.; 1795 м н.у.м.) Лорийской области и на территории города Иджеван (40.868076^0 с.ш.; 45.139026^0 в.д.; 697 м н.у.м.) Тавушской области;

– река Гетик (приток реки Агстев) – на территории населенного пункта Агавнаванк (40.733415^0 с.ш.; 45.039845^0 в.д.; 980 м н.у.м.) Тавушской области;

– озеро Севан - в окрестностях населенных пунктов Цовагюх (40.617161^0 с.ш.; 44.955475^0 в.д.; 1930 м н.у.м.), Лчашен (40.521668^0 с.ш.; 44.949006^0 в.д.; 1903 м н.у.м.) и Бердкунк (40.445989^0 с.ш.; 45.113312^0 в.д.; 1903 м н.у.м.) Гегаркуникской области.

Точки сбора материала для исследования отмечены на карте:



Карта. Точки сбора материала для исследований
Map. Points of the research material sampling

В общей сложности обследовано 150 особей 9 видов рыб:

35 особей серебряного карася (*Carassius auratus gibelio* Bloch, 1782),

32 особи храмули (*Capoeta capoeta* Güldenstädt, 1773),

26 особей восточной быстрянки (*Alburnoides eichwaldii* De Filippi, 1863),

18 особей севанского усача (*Barbus goktschaicus* Kessler, 1877),

17 особей сига (*Coregonus lavaretus* Linnaeus, 1758),

17 особей куринского усача (*Barbus cyri* De Filippi, 1865),

3 особи куринского гольца (*Oxynoemacheilus brandtii* Kessler, 1877),

1 особь куринской уклейки (уклейки Филиппи) (*Alburnus filippii* Kessler, 1877),

1 особь золотистой щиповки (*Sabanejevia aurata* De Filippi, 1863).

Рыбу для исследований отлавливали с помощью обычных рыболовных сетей.

Паразитологические исследования рыб проводили в Институте зоологии Научного центра зоологии и гидроэкологии НАН Республики Армения по общепринятой методике паразитологических вскрытий [4]. Вскрывали половозрелых особей размером от 14 до 30 см. Сбор и камеральную обработку паразитологического материала проводили по общепринятым методикам, в зависимости от систематического положения [4; 63]. Видовую идентификацию выявленных паразитов проводили по различным определителям [48-50; 63; 69].

Для оценки зараженности рыб отдельными видами паразитов использовали общепринятые паразитологические показатели – экстенсивность инвазии (ЭИ) и интенсивность инвазии (ИИ). ЭИ – отношение количества зараженных особей одного вида к общему числу исследованных особей этого вида, выраженное в процентах, ИИ – количество паразитов одного вида у конкретной зараженной особи.

Статистическую обработку результатов исследований проводили с помощью компьютерной программы BioStat 2009. Достоверность разницы ЭИ одним и тем же видом паразита у разных видов рыб оценивали с помощью критерия Фишера. Разницу средних арифметических ИИ одним и тем же видом паразита у разных видов рыб оценивали с помощью критерия достоверности Стьюдента.

Результаты исследований и обсуждение

У обследованных рыб выявлено 12 видов паразитов, относящихся к 6 классам: Oligohymenophorea: *Ichthyophthirius multifiliis* Fouquet, 1876; Monogenea: *Dactylogyrus sp.* Diesing, 1850*, Gyrodactylus sp.* von Nordmann

1832; Trematoda: *Diplostomum sp.* Rudolphi, 1819, *Allocreadium isoporum* (Looss, 1894) Looss, 1902, *Ichthyocotylurus erraticus* Rudolphi, 1809; Cestoda: *Ligula intestinalis* L., 1758, *Schyzocotyle acheilognathi* Yamaguti, 1934, *Khawia armeniaca* Cholodkovsky, 1915; Nematoda: *Rhabdochona macrostoma* Moravec et Mikailov, 1970, *Rh. fortunatowi* Dinnik, 1933; Palaeacanthocephala: *Pomphorhynchus kostylewi* Petrochenko, 1956. Обнаруженные паразиты локализовались в кишечнике, полости тела, на сердце, в хрусталиках глаз, на коже и жабрах рыб. В общей сложности паразиты найдены у 95 особей разных видов рыб; общая инвазированность рыб паразитами составила 63,3%.

Результаты исследований приведены в таблице.

Таблица.

Инвазированность рыб северо-востока Армении паразитами

Виды паразитов	Хозяин	Локализация	ЭИ, %	Средняя ИИ, экз.
Ciliophora *Ichthyophthirius multifiliis*	севанский усач	кожа	11,1	единичные
Monogenea *Dactylogyrus sp.*	севанский усач	жабры	33,3	15,17 ± 4,56*
“-“	куринский усач	“-“	23,5	33,75 ± 3,86*
Gyrodactylus sp.	куринский усач	кожа	5,9	1
Trematoda *Allocreadium isoporum*	куринский усач	кишечник	5,9	1
Diplostomum sp.	храмуля	хрусталик глаза	59,4	3,00 ± 0,29
“-“	карась	“-“	48,6	4,00 ± 0,37*
“-“	севанский усач	“-“	33,3	3,00 ± 0,37
“-“	куринский усач	“-“	35,3	2,00 ± 0,37
“-“	сиг	“-“	35,3	3,00 ± 0,58
“-“	быстрянка	“-“	35	1,22 ± 0,15*
Ichthyocotylurus erraticus	сиг	сердце	29,4	27,4 ± 9,52
Cestoda *Ligula intestinalis*	храмуля	полость тела	9,4	2,00 ± 0,58
“-“	карась	“-“	17,14	2,00 ± 0,37
Schyzocotyle acheilognathi	храмуля	кишечник	15,6	2,2 ± 1,30

“-“	севанский усач	“-“	11,1	2 и 2 экз.
“-“	куринский усач	“-“	11,8	2 и 4 экз.
Khawia armeniaca	храмуля	кишечник	6,3	4 и 4 экз.
Nematoda *Rhabdochona macrostoma*	храмуля	кишечник	6,3	4 и 4 экз.
“-“	карась	“-“	11,4	3,5 ± 1,29*
Rhabdochona fortunatowi	храмуля	“-“	12,5	14,0 ± 3,0*
“-“	карась	“-“	8,6	4,0 ± 2,0*
“-“	куринский усач	“-“	18	2,2 ± 0,67
Acanthocephala *Pomphorhynchus kostylewi*	храмуля	кишечник	6,5	4 и 4 экз.

Примечание: * - разница показателей ИИ достоверна по критерию Стьюдента

Подробнее остановимся на каждом из обнаруженных паразитов.

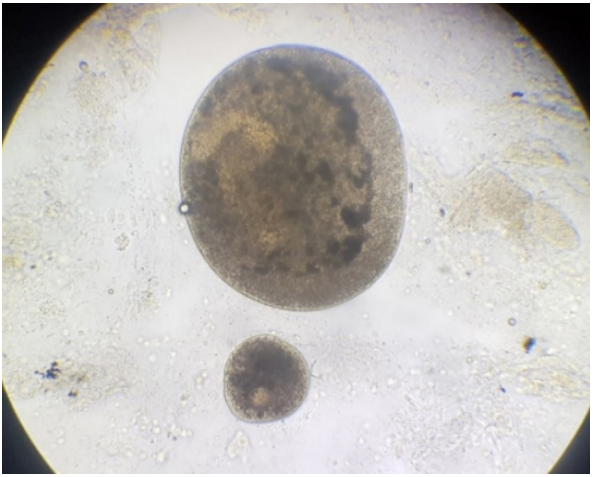


Фото 1. *Ichthyophthirius multifiliis* на коже севанского усача

***Ichthyophthirius multifiliis* Fouquet, 1876** (Ciliophora: Ichthyophthiriidae). Крупная инфузория (длиной до 1 мм), паразитирующая на многих видах рыб. Широко распространена в пресноводых водемах по всему земному

шару. Поражает внешние покровы рыб – кожу, плавники, жабры. Аллогенный вид, впервые описанный в Армении в 1983 году у карповых рыб в прудовых хозяйствах Араракской долины [18]. В дальнейшем паразит неоднократно регистрировался у рыб Араратской долины [27-29], озера Севан [11; 27; 30] и реки Раздан [39].

В северо-восточной части Армении данная инфузория встречается нечасто. Единичные паразиты были обнаружены нами на коже 2 севанских усачей, пойманных в окрестностях села Цовагюх (фото 1). Экстенсивность инвазии составила 11,1%. Суммарная зараженность рыб данным паразитом составила 1,33%.

***Dactylogyrus sp.* Diesing, 1850** (Monogenea: Dactylogyridae). Обширный род моногеней, празитирующих на жабрах пресноводных рыб, преимущественно карповых. Ранее неоднократно регистрировались в Армении у карповых, изредка - лососевых рыб, преимущественно в Араратской долине [15; 18; 29; 32-33; 42], бассейне озера Севан [9; 11], а также в реках Раздан [39; 45], Мецамор [43] и Касах [44].

Дактилогирусы были обнаружены нами на жабрах 6 особей севанского усача, пойманных в окрестностях села Цовагюх (ЭИ составила 33,3%, средняя ИИ - 15,17 ± 4,56 экз.) и на жабрах 4 особей куринского усача, пойманных в реке Гетик, недалеко от места впадения в Агстев (ЭИ составила 23,5%, средняя ИИ - 33,75 ± 3,86 экз.) (фото 2). Суммарная зараженность рыб дактилогирусами составила 6,67%. Интенсивность инвазии дактилогирусами куринских усачей достоверно выше, чем севанских усачей ($P < 0,05$).

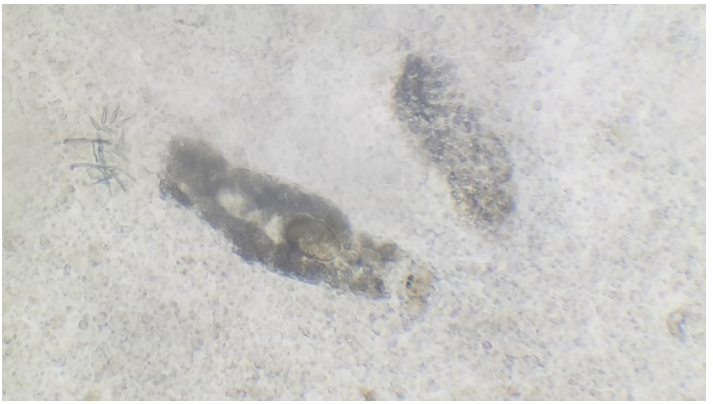


Фото 2. *Dactylogyrus sp.* в жабрах севанского усача

***Gyrodactylus sp.* von Nordmann, 1832** (Monogenea: Gyrodactylidae). Мелкие трематоды, паразитирующие на коже и плавниках пресноводных рыб, преимущественно лососевых, в Европе [65; 71].

Один экземпляр (фото 3) обнаружен нами на коже одной особи куринского усача, выловленного в устье реки Гетик. ЭИ составила 5,9%, суммарная зараженность рыб - 0,67%. Это первая находка *Gyrodactylus sp.* на территории Армении.

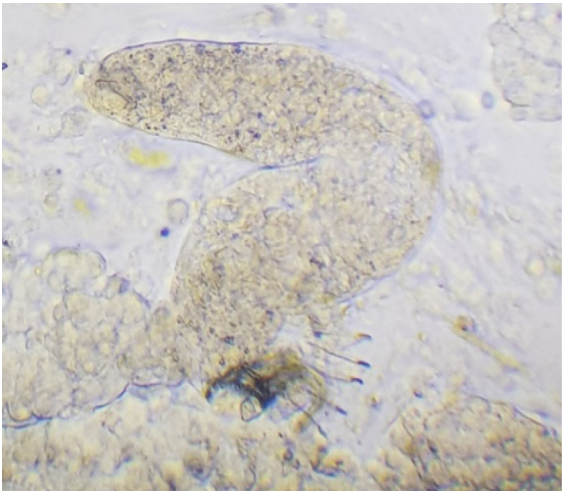


Фото 3. *Gyrodactylus sp.* на коже куринского усача

***Allocreadium isoporum* (Looss, 1894) Looss, 1902 (Trematoda: Allocreadiidae).** Небольшая трематода, паразитирующая в кишечнике пресноводных рыб, преимущественно карповых. В Армении впервые описана у севанского усача [19]. Далее неоднократно регистрировалась у севанских усачей, храмуль и сигов [6; 11; 16-17; 26; 60-61].

Половозрелая трематода найдена нами в кишечнике одной особи куринского усача, пойманной в реке Гетик. ЭИ составила 5,9%, суммарная зараженность рыб - 0,67%, ИИ у зараженной рыбы – 1 экземпляр (фото 4). Это первая находка данного гельминта за пределами бассейна озера Севан.

***Diplostomum sp.* Rudolphi, 1819 (Trematoda: Diplostomidae).** Мелкие трематоды, в половозрелой стадии паразитирующие в тонком кишенике рыбоядных птиц (цапель, чаек, уток и т.д.). Первыми промежуточными хозяевами трематод рода *Diplostomum* являются прудовики – брюхоногие

моллюски сем. Lymnaeidae: *Lymnaea (Radix) auricularia* L., 1758; *L. (Radix) stagnalis* L., 1758; *L. (Radix) ovata* Draparnaud, 1805; *L. (Radix) lagotis* Schrank, 1803 и др. Рыбы являются вторым промежуточными хозяевами. Метацеркарии паразитируют в хрусталиках глазных яблок многих видов пресноводных рыб, чаще карповых, реже – лососевых [63]. В Армении широко распространены, неоднократно регистрировались у разных видов рыб в озере Севан [5-7; 9-11; 14; 16-17; 26; 30, 37-38; 55; 59-60], водоемах Араратской долины [18; 27; 29; 32-34; 36; 40; 42], реках Раздан [39; 45] и Мецамор [43].



Фото 4. *Allocreadium isosporum* из кишечника куринского усача

Метацеркарии диплостом обнаружены нами в хрусталиках глазных яблок у следующих видов рыб (фото 5):

- 19 особей храмули, пойманных в реке Агстев и озере Севан (ЭИ 59,4%, средняя ИИ - 3,00 ± 0,29 экз.);
- 17 особей серебряного карася, пойманных в реках Гетик и Агстев (ЭИ 48,6%, средняя ИИ - 4,00 ± 0,37 экз.);
- 6 особей севанского усача (ЭИ 33,3%, средняя ИИ - 3,00 ± 0,37 экз.);
- 6 особей куринского усача, пойманныхо в реках Гетик и Агстев (ЭИ 35,3%, средняя ИИ - 2,00 ± 0,37 экз.);

- 6 особей сига, пойманных в озере Севан в окрестностях Цовагюха (ЭИ 35,3%, средняя ИИ - 3,00 ± 0,58 экз.);

- 9 особей восточной быстрянки, выловленных в реке Агстев (ЭИ 35%, средняя ИИ - 1,22 ± 0,15 экз.).

Суммарная зараженность рыб метацеркариями диплостом составила 42,0%. Интенсивность инвазии метацеркариями диплостом серебряных карасей достоверно выше, а восточных быстрянок – достоверно ниже, чем остальных видов рыб ($P < 0,05$).

Личинки диплостом считаются одним из наиболее патогенных и опасных паразитов рыб, способных причинить серьезный ущерб рыбоводству.

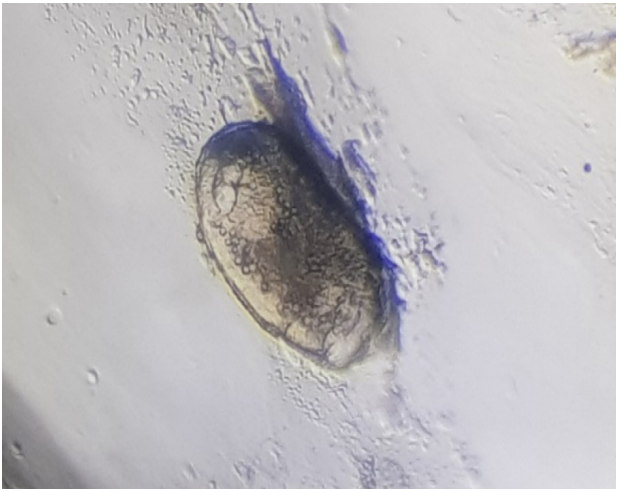


Фото 5. Метацеркарий *Diplostomum sp.* в хрусталике глаза куринского усача

***Ichthyocotylurus erraticus* Rudolphi, 1809 (Trematoda: Strigeidae).** Мелкие трематоды, в половозрелой стадии паразитирующие в тонком кишенике чаек и крачек. Метацеркарии паразитируют в сердце, реже – в перикарде, печени, почках, гонадах, стенках кишечника и плавательного пузыря, реже – в головном и спинном мозге пресноводных рыб, преимущественно сигов, реже – других лососевых и карповых [50]. Паразит попал в Армению вместе с сигом, интродуцированным в озеро Севан из Ладожского и Чудского озер в 1924 году [13]. В настоящее время в Армении сформировался стойкий природный очаг, охватывающий территорию озера Севан. Ранее в Армении *I. erraticus* регистрировался исключительно

в озере Севан у сига, реже – у севанской форели и севанской храмули [6-7; 9; 11; 14; 16; 29; 37-38; 40; 55; 59-60; 62].

Нами обнаружен в миокарде 5 сигов, пойманных в озере Севан, в окрестностях села Цовагюх (ЭИ 29,4%, средняя ИИ - 27,4 ± 9,52 экз.) (фото 6). Суммарная зараженность рыб метацеркариями ихтиокотилурусов составила 3,33%.

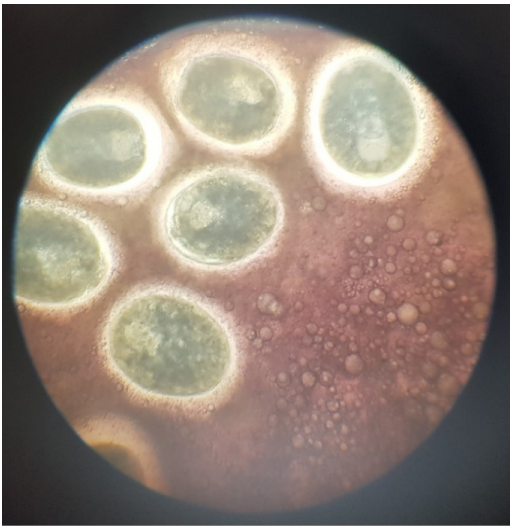


Фото 6. Метацеркарии *Ichthyocotylurus erraticus* в сердце сига

***Ligula intestinalis* Linnaeus, 1758 (Cestoda: Ligulidae).** Вид ленточных червей из семейства ремнецов, в половозрелой стадии паразитирующая в тонком кишечнике многих видов рыбоядных птиц. Первыми промежуточными хозяевами цестоды служат веслоногие ракообразные рода *Cyclops* (в основном *C. strenuus*) и диаптомусы родов *Acanthodiaptomus* и *Eudiaptomus*; рыбы (почти исключительно - пресноводные карповые рыбы) являются II промежуточными (дополнительными) хозяевами, в полости тела которых паразитируют крупные личинки – плероцеркоиды [21]. В Армении впервые описана у храмули и севанского усача в 1933 году, до спуска уровня воды озера [19]. Доминирующим в те годы видом был эндемик озера – севанская форель, невосприимчивая к лигулезу, как и акклиматизированный сиг. Поедая инвазированных мелких рыб, они элиминируют лигул из биоценоза, тем самым снижая заражение птиц лигулами

[21]. В дальнейшем лигулы неоднократно регистрировались у карповых рыб в озере Севан [1; 3; 5-6; 11; 14; 17; 26; 37-38; 40; 55; 60-61], водоемах Араратской долины [18; 28-29; 32-33; 35; 42; 56], а также реках Раздан [39; 45], Мецамор [43] и Касах [44]. Карась, будучи интродуцированным в озеро Севан в 1983 г., в качестве хозяина *Ligula intestinalis* отмечен в озере лишь в 2007 г. [10]. Обнаружение плероцеркоидов лигул в полости тела карасей свидетельствует о переходе гельминта на нового хозяина.

Потенциальными промежуточными хозяевами цестоды могут служить рачки *Cyclops. strenuus* и *Acanthodiaptomus denticornis*, широко распространенные в озере Севан [23].

Плероцеркоиды *L. intestinalis* обнаружены нами в полости тела 3 особей храмули (ЭИ 9,4%, средняя ИИ - 2,00 ± 0,58 экз.) и 6 особей серебристого карася (ЭИ 17,14%, средняя ИИ - 2,00 ± 0,37 экз.), пойманных в озере Севан (фото 7). Суммарная зараженность рыб плероцеркоидами лигул составила 6,0%. Разница показателей экстенсивности и интенсивности инвазии данных видов рыб лигулами статистически недостоверна (P > 0,05).



Фото 7. *Ligula intestinalis* из полости тела серебристого карася

***Schyzocotyle acheilognathi* Yamaguti, 1934 (Cestoda: Bothriocephalidae) (синонимы:** *Bothriocephalus acheilognathi* **Yamaguti, 1934;** *Bothriocephalus opsariichthydis* **Yamaguti, 1934;** *Bothriocephalus gowkongensis* Yeh, 1955). Крупная цестода, паразитирующая в кишечнике карповых рыб. Развитие цестоды *Schyzocotyle acheilognathi* происходит с участием одного промежуточного хозяина - веслоногих рачков *Cyclops strenuus, C. vicinus, Mesocyclops crassus* и др. [57]. Потенциальными промежуточными хозяевами цестоды в обследованных нами водоемах могут служить рачки *C. strenuus* [24; 68].

Инвазивный вид, проникший в Армению вместе с интродуцированными дальневосточными промысловыми карповыми рыбами – белым амуром и толстолобиком [13]. Ранее описан в водоемах Араратской долины [18; 27; 29; 33-35; 42], в озере Севан у храмули [11], в реках Мецамор [43] и Раздан [45], а также в Иране [68].

Нами обнаружена в кишечнике 5 храмуль (ЭИ 15,6%, средняя ИИ 2,2 ± 1,30 экземпляра) и 2 севанских усачей (ЭИ 11,1%, ИИ - по 2 экземпляра у каждой особи), выловленных в озере Севан, а также у 2 куринских усачей (ЭИ 11,8%, ИИ - 2 и 4 экземпляра), выловленных в реке Агстев. Суммарная зараженность рыб цестодой составила 6,0%. Усач как хозяин цестоды *Schyzocotyle acheilognathi* впервые в Армении отмечался в 2022 году [46]. Это означает переход данного вида гельминта к новому хозяину, а также свидетельствует о большом экспансивном потенциале гельминта.

Khawia armeniaca **Cholodkovsky, 1915 (Cestoda: Lytocestidae)** (синоним: *Caryophyllaeus armeniacus).* Специфический паразит севанской храмули, эндемик озера Севан. Впервые обнаружен у храмули Холодковским в 1915 г. [64]. Развитие цестоды происходит с участием промежуточного хозяина – олигохеты *Potamothrix hammoniensis* Michaelsen 1901 [58]. После падения уровня воды ЭИ кавиями у храмули возросла и в 1970 г. достигала 62% при ИИ 1-8 экз. [10; 26]. С конца 1980-х годов у храмули ее более не обнаруживали [10-11], однако, в 2006-2008 гг. неполовозрелые особи *K. armeniaca* были зарегистрированы у сига и севанской форели [9-10; 62]. В связи с уменьшением численности храмули и увеличением биомассы олигохет для цестоды *Kh. armeniaca,* вероятно, сформировалась новая система “паразит-хозяин”, где в качестве хозяина выступает севанский сиг. Из соседних стран *Kh. armeniaca* зарегистрирована у храмули в Иране [72].

Половозрелые кавии были обнаружены нами у 2 храмуль в озере Севан. ЭИ составила 6,3%, ИИ – по 4 экземпляра у каждой зараженной особи. Суммарная зараженность рыб кавиями составила 1,33%.

Rhabdochona macrostoma **Moravec et Mikailov, 1970 (Nematoda: Rhabdochonidae).** Нематода средних размеров, паразитирующая в кишечнике пресноводных карповых рыб. Промежуточными хозяевами служат реофильные личинки амфибиотических насекомых, в т.ч. личинки поденок (Ephemeroptera) из родов *Ephemerella*, *Heptagenia* и некоторых других [69]. Впервые в фауне Армении *Rhabdochona macrostoma* была обнаружена и описана в 2013 г. у храмуль в озере Севан [41].

Нематода *Rh. macrostoma* обнаружена нами в кишечнике 2 храмуль (ЭИ 6,3%, ИИ по 4 экземпляра у каждой зараженной особи) и 4 карасей

(ЭИ 11,4%, средняя ИИ 2,2 ± 1,30 экземпляра) из озера Севан. Суммарная зараженность рыб данной нематодой составила 4,0%.

Храмуля является преимущественно бентофагом, карась – эврифагом [13], питаясь, в том числе, бентосными личинками поденок и хирономид [2]. В реках Агстев и Гетик нами отмечено разнообразие личинок поденок, преимущественно *Ephemerella ignita.* Именно этим объясняется обнаружение у храмуль и карасей данной нематоды в обследованных водоемах.

***Rh. fortunatowi* Dinnik, 1933.** Близкий к предыдущему вид, гораздо более распространенный. Это нематода средних размеров, паразитирующая в кишечнике пресноводных карповых рыб. В Армении впервые была обнаружена и описана Динником в 1933 г. у храмуль в озере Севан [19]. Далее регистрировалась у сигов [52] и храмуль [9; 11; 37-38; 40; 55; 60] в озере Севан, а с 2019 года – в реке Касах [44].

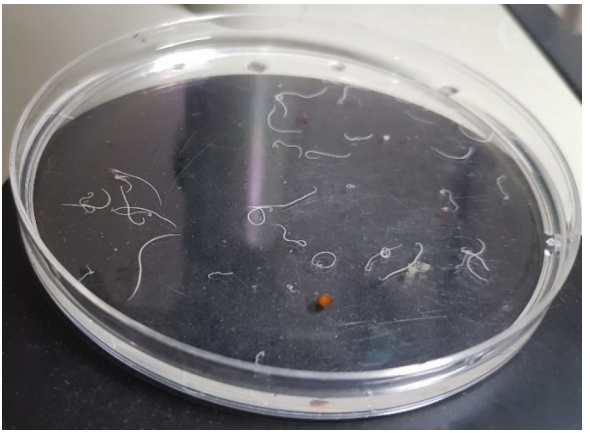


Фото 8. *Rhabdochona fortunatowi* из кишечника карася

Нематода *Rh. fortunatowi* была обнаружена нами у 4 храмуль (ЭИ 12,5%, средняя ИИ 3,50 ± 1,29 экземпляра) и 3 карасей (ЭИ 8,6%, средняя ИИ 14,0 ± 3,0 экземпляров), пойманных в озере Севан, а также у 3 выловленных из реки Гетик куринских усачей (ЭИ 18%, средняя ИИ 4,0 ± 2,0 экземпляра). Суммарная зараженность рыб данным видом гельминтов составила 6,67%. Разница показателей интенсивности инвазии рабдохонами разных видов рыб статистически достоверна ($P < 0,05$). Подъем уровня воды в озере Севан в течение последних 20 лет привел к восстановлению бентофауны, формированию различных биотопов и увеличе-

нию количественных показателей зообентоса в литорали озера, в районе затопленных участков, где, в частности, обнаружены и личинки поденок (Ephemeroptera) – промежуточные хозяева *Rh. fortunatowi* [46].

***Pomphorhynchus kostylewi* Petrochenko, 1956 (Acanthocephala: Pomphorhynchidae).** Небольшой скребень, эндемичный вид, паразитирующий в кишечнике севанской храмули [11; 19; 26; 53; 66]. Промежуточными хозяевами этого вида скребня являются мелкие пресноводные рачки-бокоплавы *Gammarus lacustris* Sars, 1863 и *Rivulogammarus pulex* Karaman, 1931. Они встречаются в местах сбора как в озерах, так и в текучих водах, обычно являются обитателями стоячих вод, однако локально встречаются в некоторых довольно быстрых ручьях и реках, не связанных с озерами. В летнее время бокоплав *G. lacustris* обитает в придонном слое воды. Он служит промежуточным хозяином для нескольких видов рода *Pomphorhynchus.*

Как по более ранним данным [2], так и в результате настоящего исследования, в составе зообентоса в литорали озера Севан обнаружен *G. lacustris*.

P. kostylewi был обнаружен нами в кишечнике у 2 особей храмули, пойманных в озере Севан (ЭИ 6,5%, ИИ - по 4 экземпляра у каждой зараженной особи) (фото 9). Суммарная зараженность рыб помфоринхами составила 1,33%.

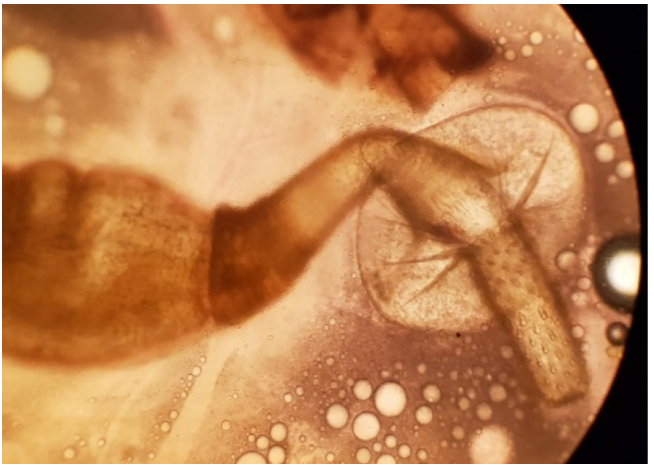


Фото 9. Хоботок *Pomphorhynchus kostylewi* из кишечника храмули

Как показали наши исследования, у ***храмули*** обнаружено 7 видов паразитов. В кишечнике храмуль обнаружены 5 видов гельминтов: цесто-

ды *Schyzocotyle acheilognathi* и *Khawia armeniaca*, нематоды *Rhabdochona macrostoma*, *Rh. fortunatowi,* а также скребень *Pomphorhynchus kostylewi.* В хрусталиках глаз обнаружены метацеркарии трематоды *Diplostomum sp.* В полости тела храмуль обнаружены плероцеркоиды ремнеца *Ligula intestinalis*.

По характеру питания храмуля является детрито-бентофагом, взрослая храмуля питается бентосом, из бентосных организмов поедая больше всего личинок поденок и хирономид; в рационе молоди храмули из бентосных организмов также доминируют личинки поденок и хирономид [2].

У ***серебряного карася*** обнаружено 4 вида паразитов. В частности, в полости тела выявлены плероцеркоиды ремнеца *Ligula intestinalis*. В хрусталиках глаз обнаружены метацеркарии трематоды *Diplostomum sp.* В кишечнике карася обнаружены два вида нематод – *Rhabdochona fortunatowi* и *Rhabdochona macrostoma,* ранее описанные у храмули. Карась как хозяин вида *Rhabdochona macrostoma* впервые в Армении отмечался нами в 2022 г. [46], что свидетельствует об адаптации данного вида гельминта к новому хозяину.

Кроме того, следует ометить сравнительную скудность паразитофауны карася в исследуемом регионе, поскольку данный вид рыб, являясь эврифагом, обычно характеризуется богатой паразитофауной с большим количеством компонентов [32-33; 36].

У ***куринского усача*** выявлено 6 видов паразитов: моногенеи *Dactylogyrus sp.* на жабрах и *Gyrodactylus sp.* на коже, половозрелая трематода *Allocreadium isosporum* и трематода *Schyzocotyle acheilognathi* в кишечнике, метацеркарии трематоды *Diplostomum sp.* в хрусталиках глаз и половозрелая нематода *Rhabdochona fortunatowi* в кишечнике. Преобладание эндопаразитов-биогельминтов позволяет характеризовать паразитофауну куринского усача водоемов северо-востока Армении как вполне сформированный комплекс [42].

У ***севанского усача*** найдено 4 вида паразитов: инфузория *Ichthyophthirius multifiliis* на наружных покровах, моногенея *Dactylogyrus sp.* на жабрах, метацеркарии *Diplostomum sp.* в хрусталиках глаз и половозрелая цестода *Schyzocotyle acheilognathi* в кишечнике. Севанский усач как хозяин цестоды *Schyzocotyle acheilognathi* впервые в Армении отмечался нами в 2022 г. [46]. Это означает переход данного вида гельминта к новому хозяину.

Несмотря на новые виды паразитов, обнаруженные у севанского усача, при сравнении полученных нами результатов с данными предыдущих исследований, можно констатировать обеднение паразитофауны указанного вида.

У ***сига*** выявлено 2 вида паразитов: метацеркарии трематоды *Diplostomum sp.* в хрусталиках глаз и метацеркарии трематоды *Ichthyocotylurus erraticus* в сердце. Инвазия диплостомами характеризуется достаточно высокой экстенсивностью (35,3%), при невысокой средней интенсивности – 3,00 ± 0,58 экз. Инвазия *I. erraticus* характеризуется средней экстенсивностью заражения (ЭИ 29,4%) при высокой интенсивности инвазии (средняя ИИ 27,4 ± 9,52 экз.). Данная трематода является обычным паразитом севанских сигов и постоянно регистрируется в сердце данного вида рыб [7; 62].

У ***восточной быстрянки*** обнаружены только метацеркарии трематоды *Diplostomum sp.* в хрусталиках глаз. Инвазия характеризуется значительной экстенсивностью (заражено 35% быстрянок), но низкой интенсивностью – по 1 метацеркарию у каждой зараженной особи.

У ***куринской уклейки***, ***куринского гольца*** и ***золотистой щиповки*** паразиты не были обнаружены.

Как показали наши исследования, паразиты рыб распределялись в разных водоемах неравномерно. В **озере Севан** у рыб было обнаружено 10 видов паразитов: инфузории *I. multifiliis,* моногенеи *Dactylogyrus sp.*, метацеркарии трематод *Diplostomum sp.* и *I. erraticus*, цестоды *Ligula intestinalis*, *Schyzocotyle acheilognathi* и *Khawia armeniaca*, нематоды *Rhabdochona macrostoma* и *Rh. fortunatowi,* акантоцефала *Pomphorhynchus kostylewi*.

Паразитофауна речной системы **Агстев-Гетик** беднее – здесь было обнаружено 6 видов паразитов: моногенеи *Dactylogyrus sp.* и *Gyrodactylus sp.*, трематоды *Allocreadium isosporum* и *Schyzocotyle acheilognathi,* метацеркарии трематод *Diplostomum sp.* и нематода *Rhabdochona fortunatowi.*

Заключение

Суммарная зараженность рыб водоемов Северо-Восточной Армении паразитами составляет 63,3%. В наибольшей степени рыбы оказались зараженными метацеркариями диплостом (42%), дактилогирусами (6,67%) и нематодой *Rhabdochona fortunatowi* (6,67%), а также плероцеркоидами лигул (6,0%) и половозрелыми цестодами *Schyzocotyle acheilognathi* (6,0%). В наименьшей степени рыбы заражены гиродактилусами (0,67%) и трематодой *Allocreadium isosporum* (0,67%).

Из обнаруженных нами паразитов наиболее патогенны для рыб метацеркарии диплостом, поражающие хрусталик глаза, и плероцеркоиды лигул, паразитирующие в полости тела рыб. Оба вида гельминтов являются возбудителями наиболее опасных гельминтозов рыб, причиняющих наибольший ущерб здоровью рыб и аквакультуре.

Среди обнаруженных паразитов 2 вида гельминтов – трематода *Diplostomum sp.* и цестода *Ligula intestinalis* - являются генералистами и относятся к аллогенным видам паразитов, использующих рыб в качестве промежуточных хозяев и достигающих половой зрелости в других позвоночных животных.

1 вид гельминтов – трематода *Ichthyocotylurus erraticus* – является аллогенным специалистом, круг хозяев которого ограничивается одним или несколькими близкородственными видами, в данном случае – сигом.

6 видов гельминтов – трематода *Allocreadium isosporum*, цестоды *Schyzocotyle acheilognathi* **и** *Khawia armeniaca***, нематоды** *Rhabdochona macrostoma* и *Rhabdochona fortunatowi,* а также акантоцефала *Pomphorhynchus kostylewi* - являются автогенными, достигающие половой зрелости в рыбах.

Наибольшее число видов паразитов установлено у храмуль (7 видов) и куринских усачей (6 видов).

Паразитофауна рыб водоемов северо-востока Армении не отличается разнообразием, что, вероятно, является следствием антропопрессии в регионе, а также связано с изменениями численности промежуточных хозяев гельминтов рыб. Кроме того, это обусловлено сравнительной изолированностью высокогорных водоемов.

На формирование паразитофауны рыб бассейна реки Агстев наиболее сильное воздействие оказывает автохтонная паразитофауна рыб реки Кура, правым притоком которой является Агстев. В несколько меньшей степени оно обусловлено воздействием инвазивных видов паразитов, проникших в регион вместе с инвазивными и интродуцированными видами рыб, в том числе промысловыми.

Список литературы

1. Акопян, В. Д., & Арутюнян, А. Л. (1966). О гельминтозах рыб озера Севан. *Биологический журнал Армении*, *19*(9), 63–65.
2. Акопян, С. А., & Джендереджян, К. Г. (2010). Зообентос озера Севан. В Д. С. Павлов, А. И. Копылов, С. А. Поддубный, Б. К. Габриелян и др. (Ред.), *Экология озера Севан в период повышения его уровня. Результаты исследований Российско-Армянской биологической экспедиции по гидроэкологическому обследованию озера Севан (Армения) (2005–2009 гг.)* (сс. 206–214). Махачкала: Наука, ДНЦ.
3. Барсегян, Н. Э., & Оганесян, Р. Л. (2011). Исследование заражённости серебристого карася (*Carassius auratus gibelio*) озера Севан *Ligula intestinais*

(Cestoda: Ligulidae) в зависимости от спектра питания и размерно-возрастной структуры популяции. В *Материалы Международной научной конференции «Биологическое разнообразие и проблемы охраны фауны Кавказа»* (сс. 69–72). Ереван.

4. Быховская-Павловская, И. Е. (1985). *Паразиты рыб. Руководство по изучению*. Ленинград, 131 с.
5. Вартанян, Л. К. (1989). Динамика паразитофауны севанской храмули. *Биологический журнал Армении*, *42*(8), 774–776.
6. Вартанян, Л. К., & Бегоян, Ж. Т. (1991). Гельминтозы рыб озера Севан. В *Тезисы докладов научной конференции «Эколого-биологические и фаунистические аспекты гельминтозов»* (с. 24). Ереван.
7. Вартанян, Л. К., & Мкртчян, З. А. (1972). Гельминтофауна и сезонная динамика заражённости сигов озера Севан. *Биологический журнал Армении*, *25*(4), 67–71.
8. Васильков, Г. В. (1999). *Паразитарные болезни рыб и санитарная оценка рыбной продукции*. Москва: Изд-во ВНИРО, 192 с.
9. Воропаева, Е. Л., & Толстенков, О. О. (2008). К изучению паразитофауны рыб озера Севан. В *Материалы IV Всероссийского съезда паразитологического общества при РАН* (Т. 1, сс. 138–141). Санкт-Петербург. EDN: https://elibrary.ru/IHKZVZ
10. Воропаева, Е. Л., Толстенков, О. О., & Оганесян, Р. Л. (2010). Современное состояние паразитофауны рыб озера Севан. В Д. С. Павлов, А. И. Копылов, С. А. Поддубный, Б. К. Габриелян и др. (Ред.), *Экология озера Севан в период повышения его уровня. Результаты исследований Российско-Армянской биологической экспедиции по гидроэкологическому обследованию озера Севан (Армения) (2005–2009 гг.)* (сс. 290–306). Махачкала: Наука, ДНЦ.
11. Воропаева, Е. Л., Толстенков, О. О., & Оганесян, Р. Л. (2011). Видовое разнообразие паразитов рыб озера Севан (Армения). *Российский паразитологический журнал*, (4), 14–26.
12. Габриелян, Б. К. (2006). *Ихтиофауна озера Севан в различные периоды понижения его уровня* [Автореферат диссертации на соискание учёной степени доктора биологических наук]. Ереван, 31 с.
13. Габриелян, Б. К. (2010). *Рыбы озера Севан*. Ереван: Гитутюн, 252 с.
14. Григорян, Дж. А. (1980). Изменение паразитофауны рыб озера Севан в разные годы (до и после спуска озера). *Биологический журнал Армении*, *33*(3), 300–306.
15. Григорян, Дж. А. (1985). К изучению фауны дактилогирусов водоёмов Армянской ССР. *Биологический журнал Армении*, *38*(6), 541–545.

16. Григорян, Дж. А., & Вартанян, Л. К. (1980). Паразитические личинки трематод рыб водоёмов Армянской ССР. *Учёные записки ЕГУ. Серия «Естественные науки»*, (1), 107–111.
17. Григорян, Дж. А., Минасян, А. К., & Вартанян, Л. К. (1976). Видовой состав и зоогеографический анализ гельминтов севанского усача. *Биологический журнал Армении*, *29*(1), 102–105.
18. Григорян, Дж. А., & Погосян, С. Б. (1983). Сравнительный фаунистический анализ паразитов рыб естественных водоёмов и прудовых хозяйств Араратской равнины. *Биологический журнал Армении*, *36*(10), 884–889.
19. Динник, Ю. А. (1933). Паразитические черви рыб озера Севан. *Труды Севанской озёрной станции*, *4*(1–2), 105–138.
20. Догель, В. А., & Полянский, Ю. И. (1958). *Основные проблемы паразитологии рыб*. Ленинград: Изд-во ЛГУ, 364 с.
21. Дубинина, М. Н. (1966). *Ремнецы Cestoda: Ligulidae фауны СССР*. Москва–Ленинград: Наука, 262 с.
22. Кошелев, Б. В. (1984). *Экология размножения рыб*. Москва: Наука, 307 с.
23. Крылов, А. В., Айрапетян, А. О., Никогосян, А. А., & Болотов, С. Э. (2016). Видовое богатство зоопланктона озера Севан. В А. В. Крылов (Ред.), *Озеро Севан. Экологическое состояние в период изменения уровня воды* (сс. 109–113). Ярославль: Филигрань.
24. Крылов, А. В., & Акопян, С. А. (2009). Особенности зоопланктона прибрежной зоны озера Севан. *Биология внутренних вод*, (3), 68–72. EDN: https://elibrary.ru/KWIMDJ
25. Куперман, Б. И. (1992). Паразиты рыб как биоиндикаторы загрязнения водоёмов. *Паразитология*, *26*(6), 479–482. EDN: https://elibrary.ru/TRMGPP
26. Минасян, А. К., & Бегоян, Ж. Т. (1971). К изучению гельминтофауны храмули озера Севан. *Биологический журнал Армении*, *24*(12), 73–79.
27. Нагашян, О. З., Андриасян, В. Б., Григорян, В. В., Щербаков, О. В., & Акопян, А. Р. (2010). Паразитофауна рыб, выращиваемых в естественных и искусственных водоёмах Армении. В *Материалы Международного симпозиума «Паразиты Голарктики»* (Ч. 2, сс. 6–8). Петрозаводск.
28. Нагашян, О. З., Щербаков, О. В., Акопян, А. Р., & Григорян, Л. Г. (2011). Патогенные простейшие рыб в прудовых хозяйствах Армении. В *Материалы Международной научной конференции «Биологическое разнообразие и проблемы охраны фауны Кавказа-1»* (сс. 210–212). Ереван.
29. Нагашян, О. З., Щербаков, О. В., Григорян, Л. Г., & Акопян, А. Р. (2015). Паразитофауна рыб в прудовых хозяйствах Армении. В *Материалы Меж-*

дународной научной конференции, посвящённой проблемам безопасности пищевых продуктов (сс. 324–329). Ереван: НАУА.

30. Нагашян, О. З., & Щербаков, О. В. (2016). Паразиты сига *Coregonus lavaretus* Linnaeus, 1758 в Армении. В *Материалы VIII Международной научной конференции «Современные проблемы зоологии и паразитологии»* (сс. 143–149). Воронеж. EDN: https://elibrary.ru/VZWKZL
31. Новак, А. И., Новак, М. Д., & Берестова, А. Н. (2016). Популяционно-видовые особенности распространения паразитов рыб Окского бассейна. *Вестник Тамбовского государственного университета*, *21*(5), 1825–1829. DOI: https://doi.org/10.20310/1810-0198-2016-21-5-1825-1829. EDN: https://elibrary.ru/WRQWDT
32. Оганесян, Р. Л. (2003). Особенности гельминтофауны рыб в карповых хозяйствах Араратской равнины. В *Материалы Международной научной конференции «Проблемы современной паразитологии»* (Ч. 2, сс. 38–41). Санкт-Петербург.
33. Оганесян, Р. Л. (2004). Гельминтологическая оценка прудовых карповых хозяйств Араратской равнины. *Паразитология*, *38*(1), 88–93. EDN: https://elibrary.ru/OIYHVZ
34. Оганесян, Р. Л. (2005). Сезонная динамика инвазированности рыб прудовых хозяйств Араратской равнины диплостомами. *Биологический журнал Армении*, *57*(3–4), 248–253.
35. Оганесян, Р. Л. (2008). Гельминтозы рыб карповых прудовых хозяйств Араратской равнины. В *Тезисы докладов научной конференции «Биоразнообразие и экология паразитов наземных и водных ценозов»* (сс. 264–266). Москва.
36. Оганесян, Р. Л. (2009). Новые виды в гельминтофауне рыб Армении. *Биологический журнал Армении*, *61*(3), 32–37. EDN: https://elibrary.ru/TRGSGN
37. Оганесян, Р. Л. (2010). К видовому составу гельминтов рыб озера Севан. *Биологический журнал Армении*, *62*(3), 34–37. EDN: https://elibrary.ru/TGBHPL
38. Оганесян, Р. Л., & Рухкян, М. Я. (2011). К гельминтофауне рыб озера Севан. *Биологический журнал Армении*, *63*(3), 20–24. EDN: https://elibrary.ru/TGBIQJ
39. Оганесян, Р. Л., & Рухкян, М. Я. (2012). К изучению паразитофауны рыб реки Раздан. *Биологический журнал Армении*, *64*(2), 122–124. EDN: https://elibrary.ru/TGBJVX
40. Оганесян, Р. Л., Акопян, С. А., & Рухкян, М. Я. (2013). Изменение фауны некоторых биогельминтов рыб озера Севан и их промежуточных хозяев в

условиях гидроэкологических преобразований. *Российский паразитологический журнал*, (3), 22–26. EDN: https://elibrary.ru/REOWBL

41. Оганесян, Р. Л., & Рухкян, М. Я. (2013). Обнаружение *Rhabdochona macrostoma* (Nematoda: Rhabdochonidae) у севанской храмули. *Биологический журнал Армении*, *65*(1), 116–119.
42. Оганесян, Р. Л., & Рухкян, М. Я. (2015). К гельминтофауне рыб водоёмов Араратского Марза. *Теория и практика борьбы с паразитарными болезнями*, *16*, 313–316. EDN: https://elibrary.ru/YICVLN
43. Оганесян, Р. Л., & Рухкян, М. Я. (2015). К гельминтофауне рыб реки Мецамор. *Биологический журнал Армении*, *67*(2), 93–95.
44. Оганесян, Р. Л., & Рухкян, М. Я. (2016). Исследование гельминтофауны рыб реки Касах, Армения. *Фауна и экология паразитов*, *49*, 85–86. EDN: https://elibrary.ru/WOIMMB
45. Оганесян, Р. Л., & Рухкян, М. Я. (2019). Исследование видового состава гельминтов рыб среднего течения реки Раздан, Армения. *Теория и практика борьбы с паразитарными болезнями*, *20*, 433–437. DOI: https://doi.org/10.31016/978-5-9902340-8-6.2019.20.433-437. EDN: https://elibrary.ru/PAHAJY
46. Оганесян, Р. Л., Рухкян, М. Я., Арутюнова, Л. Д., Магомедова, М. З., & Магомедова, П. Д. (2023). Гельминтофауна рыб озера Севан в период изменения уровня воды. *Юг России: экология, развитие*, *18*(3), 50–59. DOI: https://doi.org/10.18470/1992-1098-2023-3-50-59. EDN: https://elibrary.ru/COGTJW
47. Оганесян, Р. О. (1994). *Озеро Севан вчера, сегодня…* Ереван, 479 с.
48. Бауер, О. Н. (Ред.). (1984). *Определитель паразитов пресноводных рыб фауны СССР* (Т. 1). Ленинград: Наука, 428 с.
49. Бауер, О. Н. (Ред.). (1985). *Определитель паразитов пресноводных рыб фауны СССР* (Т. 2). Ленинград: Наука, 425 с.
50. Бауер, О. Н. (Ред.). (1987). *Определитель паразитов пресноводных рыб фауны СССР* (Т. 3). Ленинград: Наука, 583 с.
51. Полянский, Ю. И. (Ред.). (1958). *Основные проблемы паразитологии рыб*. Ленинград: Изд-во ЛГУ, 364 с.
52. Павлова, А. И. (1957). Паразиты сигов, акклиматизированных в оз. Севан. *Известия ВНИОРХ*, (42), 150–165.
53. Петроченко, В. И. (1956). *Акантоцефалы (скребни) домашних и диких животных* (Т. 1). Москва: Изд-во АН СССР, 435 с.
54. Пипоян, С. Х. (2012). *Ихтиофауна Армении: этапы формирования и современное состояние*. Palmarium Academic Publishing, 548 с.
55. Платонова, Т. А. (1963). Паразитофауна севанских рыб. В *Паразитологический сборник* (Вып. 21, сс. 65–68). Ленинград.

56. Погосян, С. Б., & Григорян, Дж. А. (1983). Цестода *Ligula intestinalis* в прудовых хозяйствах Араратской равнины. *Биологический журнал Армении*, *36*(11), 1086–1087.
57. Протасова, Е. Н. (1977). Ботриоцефаляты — ленточные гельминты рыб. В *Основы цестодологии* (Т. 8, с. 298). Москва: Наука.
58. Протасова, Е. Н., Куперман, Б. И., Ройтман, В. А., & Поддубная, Л. Г. (1990). *Кариофиллиды фауны СССР*. Москва: Наука, 214 с. ISBN: 5-02-004683-3. EDN: https://elibrary.ru/VMWACR
59. Рубенян, Т. Г., & Протасова, Е. Н. (2007). Первая регистрация плероцеркоидов *Diphyllobothrium dendriticum* (Diphyllobothriidae, Cestoda) у севанского сига (*Coregonus lavaretus*, Coregonidae). *Зоологический журнал*, *86*(3), 377–378. EDN: https://elibrary.ru/IAGRFX
60. Рубенян, Т. Г. (2008). Гельминты севанской храмули *Capoeta capoeta sevangi* (Cyprinidae) как индикаторы питания. В *Тезисы докладов научной конференции «Биоразнообразие и экология паразитов наземных и водных ценозов»* (сс. 321–324). Москва.
61. Смолей, А. И. (1987). Севанский усач. В С. О. Мовсесян (Ред.), *Красная книга Армянской ССР: Животные* (с. 123). Ереван: АН Арм ССР.
62. Толстенков, О. О. (2007). К вопросу формирования паразитофауны сига (*Coregonus lavaretus*) оз. Севан. В *Материалы 4-ой Всероссийской школы по теоретической и морской паразитологии* (сс. 196–199). Калининград.
63. Шигин, А. А. (1986). *Трематоды фауны СССР, род Diplostomum: Метацеркарии*. Москва: Наука, 254 с.
64. Cholodkovsky, N. (1915). Notes helmintologiques. *Ежегодник зоологического музея Императорской АН*, *20*, 164–166.
65. Hansen, H., Cojocaru, C.-D., & Mo, T. A. (2016). Infections with *Gyrodactylus* spp. (Monogenea) in Romanian fish farms: *Gyrodactylus salaris* Malmberg, 1957 extends its range. *Parasites & Vectors*, *9*, 444–453. DOI: https://doi.org/10.1186/s13071-016-1727-7. EDN: https://elibrary.ru/EUMQGU
66. Kostylew, N. N. (1928). Acanthocephalen der Fische des Gektschasees. *Zeitschrift für Bakteriologie und Parasitenkunde*, *108*, 146–150.
67. MacKenzi, K., Williams, H. H., Williams, B., McVicar, A. H., & Siddall, R. (1995). Parasites as indicators of water quality and the potential use of helminth transmission in marine pollution studies. *Advances in Parasitology*, *35*, 86–144.
68. Mokhayer, B., Kyabee, B., & Kohestani-Skandari, S. (2000). Investigation on the infection of khramulya (*Capoeta capoeta gracilis*) with *Acanthocephalorhynchoides* and *Tracheliastes*. *Journal of the Faculty of Veterinary Medicine University of Tehran*, *55*(2), 65–66.

69. Moravec, F. (1994). *Parasitic nematodes of freshwater fishes of Europe*. Praha, 473 p.
70. Pipoyan, S. Kh. (2021). *The fishes of Armenia. Identification Guide*. Yerevan: Antares, 168 p.
71. Rokicka, M., Lumme, J., & Ziętara, M. S. (2007). Identification of *Gyrodactylus* ectoparasites in Polish salmonid farms by PCR-RFLP of the nuclear ITS segment of ribosomal DNA (Monogenea, Gyrodactylidae). *Acta Parasitologica*, *52*, 185–195. DOI: https://doi.org/10.2478/s11686-007-0032-1
72. Williams, J. S., Gibson, D. I., & Sadighian, A. (1980). Some helminth parasites of Iranian freshwater fishes. *Journal of Natural History*, *14*, 685–699.

References

1. Akopyan, V. D., & Arutyunyan, A. L. (1966). On helminthiases of fish in Lake Sevan. *Biological Journal of Armenia*, *19*(9), 63–65.
2. Akopyan, S. A., & Dzenderedzhyan, K. G. (2010). Zoobenthos of Lake Sevan. In D. S. Pavlov, A. I. Kopylov, S. A. Poddubny, B. K. Gabrielyan et al. (Eds.), *Ecology of Lake Sevan during the period of its level rise. Research results of the Russian-Armenian biological expedition on hydroecological survey of Lake Sevan (Armenia) (2005–2009)* (pp. 206–214). Makhachkala: Nauka, DSC.
3. Barsegyan, N. E., & Oganesyan, R. L. (2011). Study of silver crucian carp (*Carassius auratus gibelio*) infection with *Ligula intestinalis* (Cestoda: Ligulidae) in Lake Sevan depending on the feeding spectrum and size-age structure of the population. In *Materials of the International Scientific Conference "Biological Diversity and Wildlife Conservation Problems of the Caucasus"* (pp. 69–72). Yerevan.
4. Bykhovskaya-Pavlovskaya, I. E. (1985). *Fish parasites: A study guide*. Leningrad. 131 pp.
5. Vartanyan, L. K. (1989). Dynamics of parasitic fauna of Sevan khramuli. *Biological Journal of Armenia*, *42*(8), 774–776.
6. Vartanyan, L. K., & Begoyan, Zh. T. (1991). Helminthiases of fish in Lake Sevan. In *Abstracts of the scientific conference "Ecological, biological and faunistic aspects of helminthiases"* (p. 24). Yerevan.
7. Vartanyan, L. K., & Mkrtchyan, Z. A. (1972). Helminth fauna and seasonal dynamics of whitefish infection in Lake Sevan. *Biological Journal of Armenia*, *25*(4), 67–71.
8. Vasilkov, G. V. (1999). *Parasitic diseases of fish and sanitary assessment of fish products*. Moscow: VNIRO Publishing. 192 pp.
9. Voropaeva, E. L., & Tolstenkov, O. O. (2008). On the study of parasitic fauna of fish in Lake Sevan. In *Materials of the IV All-Russian Congress of the Parasi-*

tological Society under the Russian Academy of Sciences (Vol. 1, pp. 138–141). Saint Petersburg. EDN: https://elibrary.ru/IHKZVZ

10. Voropaeva, E. L., Tolstenkov, O. O., & Oganesyan, R. L. (2010). Current state of parasitic fauna of fish in Lake Sevan. In D. S. Pavlov, A. I. Kopylov, S. A. Poddubny, B. K. Gabrielyan et al. (Eds.), *Ecology of Lake Sevan during the period of its level rise. Research results of the Russian-Armenian biological expedition on hydroecological survey of Lake Sevan (Armenia) (2005–2009)* (pp. 290–306). Makhachkala: Nauka, DSC.
11. Voropaeva, E. L., Tolstenkov, O. O., & Oganesyan, R. L. (2011). Species diversity of fish parasites in Lake Sevan (Armenia). *Russian Journal of Parasitology*, *(4)*, 14–26.
12. Gabrielyan, B. K. (2006). *Ichthyofauna of Lake Sevan in different periods of its level decline* [Doctoral dissertation abstract]. Yerevan. 31 pp.
13. Gabrielyan, B. K. (2010). *Fish of Lake Sevan*. Yerevan: Gitutyun. 252 pp.
14. Grigoryan, J. A. (1980). Changes in the parasitic fauna of fish in Lake Sevan in different years (before and after the lake's level drop). *Biological Journal of Armenia*, *33*(3), 300–306.
15. Grigoryan, J. A. (1985). On the study of dactylogyrid fauna in water bodies of the Armenian SSR. *Biological Journal of Armenia*, *38*(6), 541–545.
16. Grigoryan, J. A., & Vartanyan, L. K. (1980). Parasitic larvae of trematodes in fish from water bodies of the Armenian SSR. *Proceedings of Yerevan State University. Series "Natural Sciences"*, *(1)*, 107–111.
17. Grigoryan, J. A., Minasyan, A. K., & Vartanyan, L. K. (1976). Species composition and zoogeographical analysis of helminths in Sevan barbel. *Biological Journal of Armenia*, *29*(1), 102–105.
18. Grigoryan, J. A., & Pogosyan, S. B. (1983). Comparative faunistic analysis of fish parasites in natural water bodies and pond farms of the Ararat Plain. *Biological Journal of Armenia*, *36*(10), 884–889.
19. Dinnik, Yu. A. (1933). Parasitic worms in fish of Lake Sevan. *Proceedings of the Sevan Lake Station*, *4*(1–2), 105–138.
20. Dogel, V. A., & Polyansky, Yu. I. (1958). *Main problems of fish parasitology*. Leningrad: LSU Publishing. 364 pp.
21. Dubinina, M. N. (1966). *Ligulidae tapeworms (Cestoda) of the USSR fauna*. Moscow–Leningrad: Nauka. 262 pp.
22. Koshelev, B. V. (1984). *Ecology of fish reproduction*. Moscow: Nauka. 307 pp.
23. Krylov, A. V., Hayrapetyan, A. O., Nikogosyan, A. A., & Bolotov, S. E. (2016). Species richness of zooplankton in Lake Sevan. In A. V. Krylov (Ed.), *Lake Sevan: Ecological state during water level changes* (pp. 109–113). Yaroslavl: Filigran.

24. Krylov, A. V., & Akopyan, S. A. (2009). Features of zooplankton in the coastal zone of Lake Sevan. *Inland Water Biology*, *(3)*, 68–72. EDN: https://elibrary.ru/KWIMDJ
25. Kuperman, B. I. (1992). Fish parasites as bioindicators of water pollution. *Parasitology*, *26*(6), 479–482. EDN: https://elibrary.ru/TRMGPP
26. Minasyan, A. K., & Begoyan, Zh. T. (1971). On the study of helminth fauna in Sevan khramuli. *Biological Journal of Armenia*, *24*(12), 73–79.
27. Nagashyan, O. Z., Andriasyan, V. B., Grigoryan, V. V., Shcherbakov, O. V., & Akopyan, A. R. (2010). Parasitic fauna of fish raised in natural and artificial water bodies in Armenia. In *Materials of the International Symposium "Parasites of the Holarctic"* (Part 2, pp. 6–8). Petrozavodsk.
28. Nagashyan, O. Z., Shcherbakov, O. V., Akopyan, A. R., & Grigoryan, L. G. (2011). Pathogenic protozoans in fish from pond farms in Armenia. In *Materials of the International Scientific Conference "Biological Diversity and Wildlife Conservation Problems of the Caucasus 1"* (pp. 210–212). Yerevan.
29. Nagashyan, O. Z., Shcherbakov, O. V., Grigoryan, L. G., & Akopyan, A. R. (2015). Parasitic fauna of fish in pond farms in Armenia. In *Materials of the International Scientific Conference on Food Safety Issues* (pp. 324–329). Yerevan: NAA.
30. Nagashyan, O. Z., & Shcherbakov, O. V. (2016). Parasites of whitefish (*Coregonus lavaretus* Linnaeus, 1758) in Armenia. In *Materials of the VIII International Scientific Conference "Modern Problems of Zoology and Parasitology"* (pp. 143–149). Voronezh. EDN: https://elibrary.ru/VZWKZL
31. Novak, A. I., Novak, M. D., & Berestova, A. N. (2Desktop). Population and species-specific features of fish parasite distribution in the Oka basin. *Bulletin of Tambov State University*, *21*(5), 1825–1829. https://doi.org/10.20310/1810-0198-2016-21-5-1825-1829. EDN: https://elibrary.ru/WRQWDT
32. Oganesyan, R. L. (2003). Features of helminth fauna in fish from carp farms in the Ararat Plain. In *Materials of the International Scientific Conference "Problems of Modern Parasitology"* (Part 2, pp. 38–41). Saint Petersburg.
33. Oganesyan, R. L. (2004). Helminthological assessment of carp pond farms in the Ararat Plain. *Parasitology*, *38*(1), 88–93. EDN: https://elibrary.ru/OIYHVZ
34. Oganesyan, R. L. (2005). Seasonal dynamics of fish infestation with diplostomes in pond farms of the Ararat Plain. *Biological Journal of Armenia*, *57*(3–4), 248–253.
35. Oganesyan, R. L. (2008). Helminthiases of fish in carp pond farms of the Ararat Plain. In *Abstracts of the Scientific Conference "Biodiversity and Ecology of Parasites in Terrestrial and Aquatic Communities"* (pp. 264–266). Moscow.

36. Oganesyan, R. L. (2009). New species in the helminth fauna of fish in Armenia. *Biological Journal of Armenia*, *61*(3), 32–37. EDN: https://elibrary.ru/TRGSGN
37. Oganesyan, R. L. (2010). On the species composition of helminths in fish of Lake Sevan. *Biological Journal of Armenia*, *62*(3), 34–37. EDN: https://elibrary.ru/TGBHPL
38. Oganesyan, R. L., & Rukhkyan, M. Ya. (2011). On the helminth fauna of fish in Lake Sevan. *Biological Journal of Armenia*, *63*(3), 20–24. EDN: https://elibrary.ru/TGBIQJ
39. Oganesyan, R. L., & Rukhkyan, M. Ya. (2012). On the study of parasitic fauna in fish of the Hrazdan River. *Biological Journal of Armenia*, *64*(2), 122–124. EDN: https://elibrary.ru/TGBJVX
40. Oganesyan, R. L., Akopyan, S. A., & Rukhkyan, M. Ya. (2013). Changes in the fauna of certain biohelminths in fish of Lake Sevan and their intermediate hosts under hydroecological transformations. *Russian Journal of Parasitology*, *(3)*, 22–26. EDN: https://elibrary.ru/REOWBL
41. Oganesyan, R. L., & Rukhkyan, M. Ya. (2013). Detection of *Rhabdochona macrostoma* (Nematoda: Rhabdochonidae) in Sevan khramuli. *Biological Journal of Armenia*, *65*(1), 116–119.
42. Oganesyan, R. L., & Rukhkyan, M. Ya. (2015). On the helminth fauna of fish in water bodies of Ararat Marz. *Theory and Practice of Parasite Control*, *16*, 313–316. EDN: https://elibrary.ru/YICVLN
43. Oganesyan, R. L., & Rukhkyan, M. Ya. (2015). On the helminth fauna of fish in the Metsamor River. *Biological Journal of Armenia*, *67*(2), 93–95.
44. Oganesyan, R. L., & Rukhkyan, M. Ya. (2016). Study of the helminth fauna in fish of the Kasakh River, Armenia. *Fauna and Ecology of Parasites*, *49*, 85–86. EDN: https://elibrary.ru/WOIMMB
45. Oganesyan, R. L., & Rukhkyan, M. Ya. (2019). Study of the species composition of helminths in fish from the middle reaches of the Hrazdan River, Armenia. *Theory and Practice of Parasite Control*, *20*, 433–437. https://doi.org/10.31016/978-5-9902340-8-6.2019.20.433-437. EDN: https://elibrary.ru/PAHAJY
46. Oganesyan, R. L., Rukhkyan, M. Ya., Arutyunova, L. D., Magomedova, M. Z., & Magomedova, P. D. (2023). Helminth fauna of fish in Lake Sevan during water level changes. *South of Russia: Ecology, Development*, *18*(3), 50–59. https://doi.org/10.18470/1992-1098-2023-3-50-59. EDN: https://elibrary.ru/COGTJW
47. Oganesyan, R. O. (1994). *Lake Sevan: yesterday, today…* Yerevan. 479 pp.
48. Bauer, O. N. (Ed.). (1984). *Key to parasites of freshwater fish of the USSR fauna* (Vol. 1). Leningrad: Nauka. 428 pp.
49. Bauer, O. N. (Ed.). (1985). *Key to parasites of freshwater fish of the USSR fauna* (Vol. 2). Leningrad: Nauka. 425 pp.

50. Bauer, O. N. (Ed.). (1987). *Key to parasites of freshwater fish of the USSR fauna* (Vol. 3). Leningrad: Nauka. 583 pp.
51. Polansky, Yu. I. (Ed.). (1958). *Main problems of fish parasitology*. Leningrad: LSU Publishing. 364 pp.
52. Pavlova, A. I. (1957). Parasites of whitefish acclimatized in Lake Sevan. *Proceedings of VNIORH, (42)*, 150–165.
53. Petrochenko, V. I. (1956). *Acanthocephalans (thorny-headed worms) of domestic and wild animals* (Vol. 1). Moscow: USSR Academy of Sciences Publishing. 435 pp.
54. Pipoyan, S. Kh. (2012). *Ichthyofauna of Armenia: stages of formation and current state*. Palmarium Academic Publishing. 548 pp.
55. Platonova, T. A. (1963). Parasitic fauna of Sevan fish. In *Parasitological Collection* (Issue 21, pp. 65–68). Leningrad.
56. Pogosyan, S. B., & Grigoryan, J. A. (1983). Cestode *Ligula intestinalis* in pond farms of the Ararat Plain. *Biological Journal of Armenia*, *36*(11), 1086–1087.
57. Protasova, E. N. (1977). Bothriocephalata — tapeworms of fish. In *Fundamentals of Cestodology* (Vol. 8, p. 298). Moscow: Nauka.
58. Protasova, E. N., Kuperman, B. I., Roitman, V. A., & Poddubnaya, L. G. (1990). *Caryophyllidae of the USSR fauna*. Moscow: Nauka. 214 pp. ISBN 5-02-004683-3. EDN: https://elibrary.ru/VMWACR
59. Rubenyan, T. G., & Protasova, E. N. (2007). First record of plerocercoids of *Diphyllobothrium dendriticum* (Diphyllobothriidae, Cestoda) in Sevan whitefish (*Coregonus lavaretus*, Coregonidae). *Zoological Journal*, *86*(3), 377–378. EDN: https://elibrary.ru/IAGRFX
60. Rubenyan, T. G. (2008). Helminths of Sevan khramuli (*Capoeta capoeta sevangi*, Cyprinidae) as indicators of feeding. In *Abstracts of the Scientific Conference "Biodiversity and Ecology of Parasites in Terrestrial and Aquatic Communities"* (pp. 321–324). Moscow.
61. Smoley, A. I. (1987). Sevan barbel. In S. O. Movsesyan (Ed.), *Red Data Book of the Armenian SSR: Animals* (p. 123). Yerevan: Armenian SSR Academy of Sciences.
62. Tolstenkov, O. O. (2007). On the formation of parasitic fauna in whitefish (*Coregonus lavaretus*) of Lake Sevan. In *Materials of the 4th All-Russian School on Theoretical and Marine Parasitology* (pp. 196–199). Kaliningrad.
63. Shigin, A. A. (1986). *Trematodes of the USSR fauna, genus Diplostomum: Metacercariae*. Moscow: Nauka. 254 pp.
64. Cholodkovsky, N. (1915). Notes helmintologiques. *Yearbook of the Zoological Museum of the Imperial Academy of Sciences*, *20*, 164–166.

65. Hansen, H., Cojocaru, C.-D., & Mo, T. A. (2016). Infections with *Gyrodactylus* spp. (Monogenea) in Romanian fish farms: *Gyrodactylus salaris* Malmberg, 1957 extends its range. *Parasites & Vectors*, *9*, 444–453. https://doi.org/10.1186/s13071-016-1727-7. EDN: https://elibrary.ru/EUMQGU
66. Kostylew, N. N. (1928). Acanthocephalen der Fische des Gektschasees. *Zeitschrift für Bakteriologie und Parasitenkunde*, *108*, 146–150.
67. MacKenzi, K., Williams, H. H., Williams, B., McVicar, A. H., & Siddall, R. (1995). Parasites as indicators of water quality and the potential use of helminth transmission in marine pollution studies. *Advances in Parasitology*, *35*, 86–144.
68. Mokhayer, B., Kyabee, B., & Kohestani-Skandari, S. (2000). Investigation on the infection of khramulya (*Capoeta capoeta gracilis*) with *Acanthocephalorhynchoides* and *Tracheliastes*. *Journal of the Faculty of Veterinary Medicine University of Tehran*, *55*(2), 65–66.
69. Moravec, F. (1994). *Parasitic nematodes of freshwater fishes of Europe*. Praha, 473 p.
70. Pipoyan, S. Kh. (2021). *The fishes of Armenia. Identification Guide*. Yerevan: Antares, 168 p.
71. Rokicka, M., Lumme, J., & Ziętara, M. S. (2007). Identification of *Gyrodactylus* ectoparasites in Polish salmonid farms by PCR-RFLP of the nuclear ITS segment of ribosomal DNA (Monogenea, Gyrodactylidae). *Acta Parasitologica*, *52*, 185–195. https://doi.org/10.2478/s11686-007-0032-1
72. Williams, J. S., Gibson, D. I., & Sadighian, A. (1980). Some helminth parasites of Iranian freshwater fishes. *Journal of Natural History*, *14*, 685–699.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Оганесян Рузанна Левоновна, к.б.н., старший научный сотрудник лаборатории общей гельминтологии и паразитологии Научного центра зоологии и гидроэкологии
Национальная Академия наук Республики Армения
ул. П. Севака, 7, 0014, Ереван, Республика Армения
ruhov37@rambler.ru

Щербаков Олег Валерьевич, к.б.н., старший научный сотрудник лаборатории молекулярной паразитологии Научного центра зоологии и гидроэкологии
Национальная Академия наук Республики Армения
ул. П. Севака, 7, 0014, Ереван, Республика Армения
oleg1vet@yandex.ru

Акопян Сусанна Акоповна, к.б.н., заведующая лабораторией гидробиологии Научного центра зоологии и гидроэкологии
Национальная Академия наук Республики Армения
ул. П. Севака, 7, 0014, Ереван, Республика Армения
susannahakob@gmail.com

Мкртчян Джон Аспуракович, к.б.н., научный сотрудник лаборатории молекулярной паразитологии Научного центра зоологии и гидроэкологии
Национальная Академия наук Республики Армения
ул. П. Севака, 7, 0014, Ереван, Республика Армения
jonmkrtchyan.arm@gmail.com

Рухкян Мартин Яковлевич, к.б.н., старший научный сотрудник лаборатории общей гельминтологии и паразитологии Научного центра зоологии и гидроэкологии
Национальная Академия наук Республики Армения
ул. П. Севака, 7, 0014, Ереван, Республика Армения
martin-rukhkyan@yandex.ru

DATA ABOUT THE AUTHORS

Ruzanna L. Hovhannisyan, PhD, Senior Researcher at the Laboratory of General Helminthology and Parasitology, Scientific Center of Zoology and Hydroecology
National Academy of Sciences, Republic of Armenia
7, P. Sevak Str., 0014, Yerevan, Republic of Armenia
ruhov37@rambler.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4277-7785

Oleg V. Shcherbakov, PhD, Senior Researcher at the Laboratory of Molecular Parasitology, Scientific Center of Zoology and Hydroecology
National Academy of Sciences, Republic of Armenia
7, P. Sevak Str., 0014, Yerevan, Republic of Armenia
oleg1vet@yandex.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7533-1670

Susanna H. Hakobyan, PhD, Head of the Laboratory of Hydrobiology, Scientific Center of Zoology and Hydroecology

National Academy of Sciences, Republic of Armenia
7, P. Sevak Str., 0014, Yerevan, Republic of Armenia
susannahakob@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0009-0000-3700-2024

Jon A. Mkrtchyan, PhD, Researcher at the Laboratory of Molecular Parasitology, Scientific Center of Zoology and Hydroecology
National Academy of Sciences, Republic of Armenia
7, P. Sevak Str., 0014, Yerevan, Republic of Armenia
jonmkrtchyan.arm@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0009-0007-9937-8132

Martin Ya. Rukhkyan, PhD, Senior Researcher at the Laboratory of General Helminthology and Parasitology, Scientific Center of Zoology and Hydroecology
National Academy of Sciences, Republic of Armenia
7, P. Sevak Str., 0014, Yerevan, Republic of Armenia
martin-rukhkyan@yandex.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9559-9719

Поступила 08.11.2024 Received 08.11.2024
После рецензирования 10.01.2025 Revised 10.01.2025
Принята 28.01.2025 Accepted 28.01.2025

НАУЧНЫЕ ОБЗОРЫ И СООБЩЕНИЯ

SCIENTIFIC REVIEWS AND REPORTS

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-4-1213 **EDN: KSATCP**
УДК 615.322:547.458.015.4:616.45-001.1/.3

Научные обзоры

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЭКСТРАКТА ПОЛИСАХАРИДА ЦВЕТКА КАЛЕНДУЛЫ В ПОСТСТРЕССОРНОМ ПЕРИОДЕ

Д.С. Ванина, Ю.Ю. Бяловский, И.А. Сычев, А.А. Буржинский, Р.К. Воронина

Аннотация

Обоснование. Стресс и его последствия стали одной из самых значительных медико-социальных проблем современности, затрагивая около 80% всех заболеваний. Каждый человек, независимо от возраста, пола, культуры или социального статуса, подвержен влиянию стресса. Это обстоятельство обуславливает растущий интерес к изучению адаптационных реакций на различные виды стресса, их негативных последствий и поиску эффективных и быстрых методов для их предотвращения и устранения в современном обществе.

Разнообразие адаптационных реакций, их механизмы и возможности оптимизации, а также способы повышения устойчивости организма к неблагоприятным воздействиям остаются важными вопросами патологической физиологии и фармакологии.

В последние десятилетия особенно актуальным направлением стало исследование новых природных растительных адаптогенов, которые могут ограничивать стресс, и которые более распространены, чем традиционные, такие, как женьшень, родиола розовая и элеутерококк колючий. Клиническая ценность этих новых адаптогенов определяется их способностью эффективно оптимизировать процессы экстренной и длительной адаптации, что включает в себя снижение гиперергических повреждений, возникающих при стрессе, акти-

визацию восстановительных метаболических процессов, продление стадии устойчивости и предотвращение развития стадии истощения. Кроме того, новые растительные адаптогены должны обладать лечебными свойствами, способствуя более быстрому восстановлению после стрессовых повреждений и нарушений функций различных систем и органов.

Цель. Изучить влияние полисахарида, извлеченного из цветков календулы, на регуляцию эритропоэза и восстановление гемопоэтических функций у животных в условиях стресса, а также оценить его потенциал как терапевтического средства для улучшения состояния организма в постстрессорный период.

Материалы и методы. В процессе работы был проведен обзор литературных данных из открытых медицинских баз данных, таких как eLibrary, PubMed, Google Scholar и китайская база цитирований CNKI. Обзор носил несистематический характер и представлял собой семантический анализ исследований, проведенных за последние 10 лет (с 2014 по 2024 годы). В результате было найдено более 4000 публикаций. Полученные материалы были проанализированы и обсуждены исследовательской группой, и в итоговый обзор были включены только те работы, которые соответствовали следующим критериям: исследование посвящено изучению механизмов стресса и их коррекции; представляет собой экспериментальное или клиническое исследование с четко описанной методологией, позволяющей считать результаты достоверными; опубликовано в рецензируемых научных журналах; полнотекстовая версия статьи доступна в открытых базах данных или может быть получена у авторов через Research Gate.

Результаты. Данный обзор посвящен рассмотрению различных аспектов биологической активности растительных полисахаридов, в частности, извлекаемых из цветков календулы лекарственной и возможности их применения в качестве эффективных растительных адаптогенов при стрессе.

Заключение. Результаты эксперимента показали, что полисахарид способствует снижению количества эритробластических островков в костном мозге и уровня эритроцитов в крови, что может свидетельствовать о его способности регулировать эритропоэз. Кроме того, отмечено значительное увеличение уровня гемоглобина и его концентрации в эритроцитах, а также повышение активности каталазы в мембранах эритроцитов у животных, получавших полисахарид. Эти данные подтверждают возможность использования полисахарида из календулы в качестве терапевтического средства для восстановления гемопоэтических функций и улучшения состояния организма в постстрессорный период, что открывает новые перспективы для дальнейших исследований в данной области.

Ключевые слова: стресс; эустресс; дистресс; стресс-реализующие механизмы; стресс-лимитирующие механизмы; окислительный стресс; гематологические проявления стресса; полисахариды

Для цитирования. Ванина, Д. С., Бяловский, Ю. Ю., Сычев, И. А., Буржинский, А. А., & Воронина, Р. К. (2025). Перспективы применения полисахарида цветка календулы в пострессорном периоде. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(4), 577-610. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-4-1213

Scientific Reviews

PROSPECTS FOR THE USE OF CALENDULA FLOWER POLYSACCHARIDE EXTRACT IN THE POST-STRESS PERIOD

D.S. Vanina, Yu.Yu. Byalovsky, I.A. Sychev, A.A. Burzhinsky, R.K. Voronina

Abstract

Background. Stress and its consequences have become one of the most significant medical and social problems of our time, affecting about 80% of all diseases. Everyone, regardless of age, gender, culture or social status, is affected by stress. This circumstance leads to a growing interest in the study of adaptive reactions to various types of stress, their negative consequences and the search for effective and fast methods to prevent and eliminate them in modern society.

The variety of adaptive reactions, their mechanisms and optimization possibilities, as well as ways to increase the body's resistance to adverse effects remain important issues of pathological physiology and pharmacology.

In recent decades, a particularly relevant area has become the study of new natural plant adaptogens that can limit stress, and which are more common than traditional ones, such as ginseng, rhodiola rosea and eleutherococcus prickly. The clinical value of these new adaptogens is determined by their ability to effectively optimize the processes of emergency and long-term adaptation, which includes reducing hyperergic damage caused by stress, activating regenerative metabolic processes, prolonging the stage of resistance and preventing the development of the stage of exhaustion. In addition, new plant adaptogens should have medicinal properties, contributing to faster recovery after stress damage and dysfunction of various systems and organs.

Purpose. To study the effect of polysaccharide extracted from calendula flowers on the regulation of erythropoiesis and restoration of hematopoietic functions in animals under stress, as well as to evaluate its potential as a therapeutic agent for improving the body's condition in the post-stress period.

Materials and methods. In the course of the work, a review of literature data from open medical databases such as eLibrary, PubMed, Google Scholar and the Chinese CNKI citation database was conducted. The review was unsystematic in nature and was a semantic analysis of research conducted over the past 10 years (from 2014 to 2024). As a result, more than 4,000 publications were found. The materials received were analyzed and discussed by the research group, and only those papers that met the following criteria were included in the final review: the study is devoted to the study of stress mechanisms and their correction; it is an experimental or clinical study with a clearly described methodology that allows the results to be considered reliable; published in peer-reviewed scientific journals; the full-text version of the article is available in open databases or can be obtained from the authors through the Research Gate.

Results. This review is devoted to the consideration of various aspects of the biological activity of plant polysaccharides, in particular those extracted from calendula officinalis flowers and the possibility of their use as effective plant adaptogens under stress.

Conclusion. The results of the experiment showed that the polysaccharide helps to reduce the number of erythroblastic islets in the bone marrow and the level of red blood cells in the blood, which may indicate its ability to regulate erythropoiesis. In addition, there was a significant increase in hemoglobin levels and its concentration in erythrocytes, as well as an increase in catalase activity in erythrocyte membranes in animals treated with polysaccharide. These data confirm the possibility of using calendula polysaccharide as a therapeutic agent for restoring hematopoietic functions and improving the body's condition in the post-stress period, which opens up new prospects for further research in this field.

Keywords: stress; eustress; distress; stress-implementing mechanisms; stress-limiting mechanisms; oxidative stress; hematological manifestations of stress; polysaccharides

For citation. Vanina, D. S., Byalovsky, Yu. Yu., Sychev, I. A., Burzhinsky, A. A., & Voronina, R. K. (2025). Prospects for the use of calendula flower polysaccharide in the post-stress period. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(4), 577-610. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-4-1213

Введение

Широкое распространение стресса и его последствий в современном мире имеют отношение к 80% всех заболеваний и являются одной из са-

мых весомых медико-социальных проблем. Влиянию стресса сегодня подвержен любой человек независимо от возраста, пола, культуры и социального положения. Все это обуславливает повышенное внимание к изучению реакций адаптации при различных видах стресса, их неблагоприятных последствий и поисков способов противодействия им с нахождением эффективных и быстрых методов снятия и предупреждения стресса и его последствий в современном мире [34].

Разновидности реакций адаптаций, их механизмы и возможности их оптимизации, пути и способы повышения резистентности организма к неблагоприятным воздействиям различной природы остаются в ряду важных проблем патологической физиологии и фармакологии.

В последние десятилетия особенно перспективным направлением в этом плане является поиск и изучение механизмов стресс-лимитирующего действия новых естественных растительных адаптогенов, содержащихся в растениях более распространенных, чем женьшень, родиола розовая, элеутерококк колючий и т.д. При этом клиническая ценность новых растительных адаптогенов, помимо их сравнительно легкой доступности, должна определяться их способностью к эффективной оптимизации этапов экстренной и длительной адаптации, что в общем виде должно сводиться к торможению или подавлению гиперергических повреждений, способных развиться при стрессе в стадию тревоги, к усилению восстановительных метаболических процессов, пролонгированию стадии резистентности и к задержке или предотвращению развития стадии истощения.

Помимо этого, новые растительные адаптогены должны обладать и лечебными свойствами, способствуя более быстрой ликвидации стрессорных повреждений и нарушений функции различных систем и органов.

Цель – изучить влияние полисахарида, извлеченного из цветков календулы, на регуляцию эритропоэза и восстановление гемопоэтических функций у животных в условиях стресса, а также оценить его потенциал как терапевтического средства для улучшения состояния организма в постстрессорный период.

Материалы и методы

В ходе исследования был проведен обзор литературных источников в открытых медицинских базах данных, таких как eLibrary (https://elibrary.ru), PubMed (https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov), Google Scholar (https://scholar.google.com/) и китайская база цитирований CNKI (https://oversea.cnki.net/index). Обзор не имел систематического характера и включал

семантический анализ публикаций за последние 10 лет (с 2014 по 2024 годы). В результате было выявлено более 4000 статей. Полученные данные были проанализированы и обсуждены исследовательской группой, и в итоговый обзор вошли только те работы, которые соответствовали следующим критериям:

1) Исследование посвящено механизмам стресса и их коррекции.

2) Представляет собой экспериментальное или клиническое исследование с четко описанной методологией, обеспечивающей достоверность результатов.

3) Опубликовано в рецензируемых научных журналах.

4) Доступен полнотекстовый вариант статьи в открытых базах данных или по запросу к авторам через ResearchGate.

Результаты и обсуждение

Понятие стресса как специфического состояния организма, возникающего в ответ на любое нарушение гомеостаза, было введено в биологию и медицину W. Cannon (1935), опираясь на ранние работы T.R. Glynn (1910).

Классические труды H. Selye (1946) послужили основой для формирования концепции стресса, как «общего адаптационного синдрома» [12; 26; 34].

Г. Селье классифицировал стресс по двум основным критериям. По влиянию на организм он выделял эустресс (полезный стресс) и дистресс (негативный стресс), а по продолжительности – острый (кратковременный, шок) и хронический (долговременный) стресс [27]. Селье также установил, что разные стрессоры (физические, химические, биологические) вызывают у организма схожий набор реакций, в котором ключевую роль играют гипоталамус, гипофиз, надпочечники и вегетативная нервная система. Этот комплекс реакций сопровождается характерными признаками, известными как триада Селье: увеличение коркового слоя надпочечников, уменьшение тимуса и лимфатических узлов, а также появление эрозий, язв и точечных кровоизлияний в желудочно-кишечном тракте. Важно отметить, что при слабом стрессоре или высокой устойчивости организма эти симптомы могут быть неявными. Селье назвал эту неспецифическую реакцию организма “общим адаптационным синдромом”, который протекает в три последовательные стадии: стадию тревоги, стадию резистентности и стадию истощения [27].

Первая стадия стресса (стадия тревоги), длящаяся от нескольких часов до 1-2 суток, характеризуется быстрыми адаптационными механизмами. Эти механизмы включают изменения в активности вегетативной нервной

системы, эндокринных органов, обмена веществ, и эмоционально-поведенческих реакций, интегрируемые и регулируемые гипоталамо-гипофизарно-надпочечниковой системой. На первом этапе возбуждение ЦНС и симпатоадреналовой системы приводит к выбросу катехоламинов (борьба и/или бегство), а также глюкокортикостероидов (ГКС), в результате чего организмом резко увеличивается расход энергии, существенно более высокий в сравнении с энергетическими затратами при физической работе. На стадии тревоги обычно наблюдаются сильные эмоциональные всплески, а в метаболизме преобладают процессы распада веществ.

Стадия резистентности, возникающая при продолжительном воздействии стрессора, может длиться от нескольких дней до недель. Она характеризуется усилением синтеза РНК и определенных белков, мобилизацией иммунной системы и повышением выработки глюкокортикоидов. Если гормональные и метаболические изменения на этой стадии обратимы, организм способен вернуться к своему исходному состоянию, предшествовавшему стрессу [25].

Стадия истощения может развиться при нарушении работы гипоталамо-гипофизарной или симпатоадреналовой систем. Это нарушение может быть вызвано как уже существующей недостаточностью, так и непрекращающимся воздействием стрессора или его повышенной интенсивностью. Стадия истощения характеризуется подавлением адаптационных реакций. При прекращении действия стрессора организм может восстановиться до исходного состояния. Однако, если воздействие стрессора продолжается, может развиться болезнь, вплоть до летального исхода.

В последние десятилетия концепция Г. Селье была дополнена введением таких понятий, как «аллостаз» и «аллостатическая нагрузка».

Термин «аллостаз» предложен P. Sterling и J. Eyer (1988) [54], в последующем развит B.S. McEwen et al. (1999-2020) и сегодня находит широкое применение. Аллостаз определяется, как совокупность физиологических реакций организма, обеспечивающая его адаптацию к ежедневным воздействиям различных факторов среды и сохранение физиологической стабильности. Исходя из этой концепции, представляется, что гомеостаз направлен на поддержание параметров, имеющих жесткие константы (температура тела, pH, напряжение кислорода) в пределах, совместимых с жизнью (реостаз), в то время как под аллостазом (сохранение стабильности через изменения) [53] понимают необходимые для адаптации изменения параметров, имеющих пластичные константы (ЧСС, АД, количество и состав форменных элементов крови и т.п.).

Относительно полное восстановление физиологического равновесия до стрессового уровня, достижимое по окончании эустресса, не всегда возможно при дистрессе [17]. В ситуациях дистресса равновесие устанавливается на другом уровне, обеспечивающем новое стабильное (аллостатическое) состояние. В рамках данной концепции введено понятие «аллостатическая нагрузка», рассматриваемая как совокупность накопленных и вновь приобретенных функциональных и структурных изменений, обеспечивающих адаптацию организма к неблагоприятным изменениям среды [45].

Таким образом, поддержание гомеостаза по окончании воздействия стрессора подразумевает восстановление исходных биологических параметров функционирования (реостаз) в то время, как аллостаз, адаптируя протекание физиологических процессов в условиях дистресса, до исходного уровня полностью данные процессы не восстанавливает [39].

Сохранение гомеостаза путем коррекции ошибки через обратную связь (реостаз) не всегда возможно при ограниченности требуемого времени реагирования и/или при дефиците энергетических и структурно-функциональных резервов организма. Концепция аллостаза предполагает прогнозирование возможных потребностей и готовность к их удовлетворению прежде, чем они возникают. Подобная стратегия реагирования для успешности своей реализации требует наличия специализированного органа (мозга) [10].

Кроме того, концепция аллостаза детализирует взаимосвязь между стрессом и развитием заболеваний. Она показывает, как с увеличением «аллостатической нагрузки» – суммарного воздействия стрессовых факторов на протяжении жизни – возрастает риск развития болезней [41]. В сущности, вся терапия последствий стресса и его профилактика сводится преимущественно к возможно большему оптимальному снижению (ограничению) аллостатической нагрузки, как реальной, так и потенциально возможной.

Адаптация живого организма опосредуется как изменениями активности вегетативной, нейроэндокринной и иммунной систем, так и трансформациями поведенческих реакций [48; 58].

В настоящее время установлено, что в реакцию адаптации при стрессе активно вовлекаются и участвуют в них практически все органы и системы живого организма, вследствие чего развитие стресса и выход из него сопровождается существенными и не всегда благоприятными изменениями многих физиологических параметров и поведенческих реакций.

Хронический стресс и чрезмерная активность симпатоадреналовой системы опасны, так как вызывают негативное воздействие катехоламинов на сердце и сосуды. Это проявляется снижением вариабельности сердечного ритма, тахикардией и повышением артериального давления [36; 42]. Помимо этого, хронический дистресс может привести к дисфункции эндотелия, нарушениям в системе гемостаза (склонности к повышенному свёртыванию крови) [56], а также к метаболическим расстройствам, таким как гипергликемия и дислипидемия [14; 44]. Увеличение аллостатической нагрузки и острые стрессовые реакции способствуют развитию воспаления в органах пищеварительной системы, нарушениям кровоснабжения и проницаемости слизистой оболочки. В долгосрочной перспективе хронический стресс повышает риск возникновения кислотозависимых заболеваний желудочно-кишечного тракта [13].

Установлено, что стресс приводит к снижению массы и клеточности, а также к изменениям гистологической структуры лимфоидных органов [49; 51]. В 1905 г. немецкий морфолог J. Hammar описал уменьшение тимуса у детей при развитии инфекций, назвав описанный им феномен его акцидентальной, т.е. случайной (от лат. *accidentia* – случай), инволюцией. Сегодня акцидентальная инволюция тимуса, центрального органа регуляции иммуногенеза, отражающая угнетение его функции, признана характерной для стресса. У экспериментальных животных, подвергшихся облучению, физическим нагрузкам, гипокинезии или эмоциональному воздействию, неоднократно наблюдались изменения в тимусе, аналогичные его типичной акцидентальной инволюции, возникающей при инфекциях. Главную роль в развитии акцидентальной инволюции тимуса при стрессе отводят глюкокортикостероидам (ГКС). Они вызывают прогрессирующие повреждения кортизол-чувствительных лимфоцитов, которые составляют значительную часть (70-80%) всех тимоцитов. Под влиянием ГКС такие лимфоциты либо подвергаются апоптозу, либо быстро дифференцируются, снижая чувствительность к стероидным и тимическим гормонам. Таким образом, стресс сопровождается формированием у индивида иммунодефицита, тесно связанного с избытком кортизола (у животных – кортикостерона), что может реализовываться воспалением, служащим благоприятным фоном для развития различных хронических заболеваний, в том числе и онкологических [22].

Стресс практически всегда сопровождается лимфоцитопенией (снижением уровня лимфоцитов), которая наиболее выражена на стадии тревоги и, особенно, на стадии истощения. Причем стадия истощения характери-

зуется практически полной атрофией тимуса, что, по сути, равносильно тяжелому первичному иммунодефициту.

Обусловленное стрессом повышение уровня кортизола (кортикостерона) помимо изменений в тимусе и лимфоцитопении приводит также к деструктивным процессам в селезёнке и лимфатических узлах со значительным снижением их клеточности [7].

Кроме того, глюкокортикоиды подавляют образование рецепторов на мембранах макрофагов, что приводит к угнетению фагоцитарной активности.

Установлено, что при эустрессе неспецифические реакции системы крови носят характер «срочной защиты», сводясь к мобилизации эритроцитов и гранулоцитов в сосудистое русло из костного мозга, селезенки и сосудистых депо, а также миграцией лимфоцитов в ткани, последствия чего нивелируются к концу 1–2-х суток.

При продолжительном или интенсивном воздействии стрессора (дистресс) в стадии тревоги наблюдается не только снижение числа лимфоидных клеток в тимусе, лимфатических узлах и селезенке, но и уменьшение количества гранулоцитов и колониеобразующих единиц (КОЕ) в костном мозге. Одновременно происходит усиленная пролиферация миелоидных клеток в костном мозге и повышение уровня нейтрофилов в периферической крови. Это связано с высвобождением как зрелых костномозговых клеток в кровоток, так и выходом нейтрофилов из пристеночного пула в кровеносных сосудах.

Со стороны красной крови в экспериментах в стадии тревоги стресс первоначально сопровождается увеличением количества эритроцитов крови животных, обусловленным их выбросом из костномозговых и сосудистых депо в течение первых суток, после чего констатируется заметное снижение их числа, что, в частности, связывают со снижением их осмотической резистентности и повышенным гемолизом, а также с угнетением эритроидного ростка кроветворения со снижением числа эритробластических островков в костном мозге [37]. Десятикратное снижение осмотической резистентности эритроцитов и кратковременная депрессия эритропоэза считаются особенно характерной особенностью нарушения эритроидного звена, присущей экспериментальной модели иммобилизационного стресса.

В качестве возможных причин первичного подавления эритроидного ростка при стрессе рассматриваются также недостаточность энергетических и пластических ресурсов и быстрое исчерпание резерва костномоз-

говых эритроидных клеток, чему, в частности, способствует увеличение активности перекисного окисления липидов (ПОЛ), обусловленное многократным повышением уровня катехоламинов в крови при стресс-активации симпатоадреналовой системы, эволюционно направленным на увеличение количества активных форм кислорода в органах мишенях и накопление продуктов липопероксидации, оказывающих особенно выраженное повреждающее действие на клетки крови.

Для второй стадии (резистентности) характерна стабилизация числа клеток крови на сниженном уровне или некоторое его увеличение. В отдельных ростках могут наблюдаться и явления гиперплазии. Максимальная активация эритропоэза при этом обычно наблюдается в течение 1-5 сут. после перенесенного стресса.

Третья стадия (истощения) характеризуется снижением содержания клеток в различных отделах системы крови до уровня, нередко несовместимого с поддержанием жизни.

Наличие всех стадий, а также их продолжительность и степень выраженности изменений в системе крови зависят от силы, длительности и специфических особенностей воздействия стрессора на организм. Так, было показано, например, что использование модели иммобилизационного стресса в условиях разного режима повторных одночасовых иммобилизаций способно приводить как к стимуляции, так и к угнетению периферического звена эритрона в зависимости от наличия сниженной или повышенной (соответственно) устойчивости к гипоксии стрессированных животных.

Эксперименты демонстрируют, что различные виды острого и хронического стресса влияют на эпигенетический статус хроматина в нейрональных клетках мозга (в коре, гиппокампе, миндалевидном теле, прилежащем ядре) и клетках крови, способствуя развитию постстрессорных патологий [23; 52].

Для предотвращения и лечения негативных последствий стресса, а также для повышения неспецифической резистентности организма эффективно применяют адаптогены, витамины и препараты, регулирующие стресс-лимитирующие системы. В экстремальных ситуациях, требующих активации защитно-приспособительных механизмов, природные вещества зачастую не уступают, а иногда и превосходят по эффективности синтетические препараты.

Разработка эффективных способов повышения устойчивости к стрессу остается одной из актуальнейших проблем современной физиологии

и медицины. В этом плане большой интерес вызывают исследования лекарственных средств, способных оказывать одновременное, комплексное воздействие на системы, определяющие возвращение организма в состояние рео- или аллостаза после перенесенного стресса. Одним из перспективных адаптогенных средств в этом отношении являются лекарственные препараты из растений.

Представителям растительного мира присущи синтез и накопление большого числа различных биологически активных веществ (полисахариды, эфирные масла, фенологликозиды, кумарины, флавоноиды, каротиноиды и др.), что объясняет часто наблюдаемые плюрипотентные эффекты, возникающие одновременно в разных органах и системах. При использовании в медицинской практике различных лечебных препаратов из растений в России сегодня активно применяется около 250 видов официнальных растений. Собраны сведения о биологической активности около 12000 растительных химических биологически активных веществ, относящихся к различным классам природных органических соединений [57].

Поиск и изучение новых лекарственных средств растительного происхождения остается важным направлением в современной фармакологии. Растительные препараты обладают широким спектром фармакологических эффектов, характеризуются значительной терапевтической широтой, редко вызывают побочные эффекты и экономически выгодны в производстве. Все большее применение в различных областях биомедицины и биотехнологии при этом находят растительные полисахариды, обладающие подобными преимуществами в полной мере и отличающиеся повышенной вариабельностью и сложностью химической и стереохимической структуры, что делает перспективным изучение возможности их использования в качестве адаптогенов при стрессе [38; 43; 47].

Растительные полисахариды (РПС) являются полимерными продуктами конденсации более, чем 10 моносахаридов и их производных, образующих между собой О-гликозидные связи с формированием линейных или разветвленных цепей, с молекулярной массой от нескольких тысяч до нескольких миллионов. Полимерные единицы при этом могут быть представлены различными комбинациями из числа около 20 моносахаридов: гексозами (глюкоза, галактоза, фруктоза), пентозами (ксилоза, арабиноза) и уроновыми кислотами (глюкуроновая, галактуроновая, маннуроновая).

Полисахариды (РПС) делятся на два типа: гомополимеры (например, крахмал и клетчатка), состоящие из одинаковых моносахаридных единиц, и гетерополимеры (например, инулин, гемицеллюлоза, пектиновые веще-

ства, слизи и камеди), построенные из различных моносахаридов и их производных.

Гетерополисахариды могут быть олигомерными или полимерными, линейными или разветвленными, их мономеры могут образовывать между собой самые различные соединения, что объясняет разнообразие видов их биологической активности. Столь выраженное структурное разнообразие соответствует большим, в сравнении с белками, возможностям для взаимодействия и образования различных соединений, вследствие чего их молекулы в растениях имеют большое значение для процессов молекулярного и клеточного узнавания, дифференцировки и передачи биологических сигналов.

РПС являются аморфными веществами, нерастворимыми в неполярных растворителях и в спирте. Растворимость в воде вариабельна, хорошо растворяются в воде слизи, декстрины. Целлюлоза и ксиланы в воде не растворяются, пектин и агар-агар образуют студни, для извлечения из сырья используют горячую или холодную воду, растворы кислот или щелочей. При гидролизе РПС распадаются на моно- или олигосахариды, содержащие 2-4 моносахаридных единицы.

В медицинской практике для лечебных целей используются так называемые «некрахмальные» растительные полисахариды (РПС), к числу которых относят пектины, содержащиеся во всех высших цветковых растениях и являющиеся основным предметом данного обзора, а также альгинаты (соли альгиновой кислоты, выделяемые из бурых морских водорослей), каррагинаны (в красных морских водорослях), хитозаны (панцыри ракообразных) и фукоиданы (бурые морские водоросли, кукумарии).

Пектины, являясь компонентом практически всех растений, выполняют множество жизненно важных функций и обладают широким спектром физиологической активности. Они представляют собой группу кислых полисахаридов, основная цепь которых состоит из 1,4-связанных остатков ά-D-галактуроновой кислоты.

Пектины включают протопектин, пектиновые полисахариды и дополнительные углеводы, такие как арабинаны, галактаны и арабиногалактаны. Они присутствуют как в нерастворимой форме (протопектин), так и в растворимых полисахаридах растительных соков.

В составе клеточных стенок растений пектины обеспечивают прочность, защиту от высыхания и фитопатогенов, способствуют заживлению повреждений и формируют межклеточное вещество. Оболочки молодых растительных клеток состоят в основном из протопектина, заменяемого,

по мере старения и отмирания клеток, целлюлозой. В растениях их молекулы играют ключевую роль в процессе молекулярного и клеточного узнавания, дифференцировке и передачи биологических сигналов [30; 43].

В растениях пектиновые вещества преимущественно находятся в виде протопектина. Извлечение пектиновых веществ из растительного сырья обычно происходит путём нагревания с кислотными растворами. Затем экстракт концентрируют, фильтруют и осаждают этанолом.

Основным мономером пектиновых веществ является ά-галактуроновая кислота, связанная с галактанами и арабаннами. По степени полимеризации среди них различают водорастворимые: пектовые кислоты (±100 мономеров), соли пектовых кислот (пектаты), пектиновые кислоты (пектины) (100-200 мономеров), соли пектиновых кислот (пектинаты) и нерастворимые в воде протопектины (высокомолекулярные полимеры полигалактуроновой кислоты метоксилированной с галактаном и арабинатом и включениями остатков рамнозы).

Биологическая активность некрахмальных полисахаридов (НРПС) обусловлена их способностью взаимодействовать с другими полисахаридами и белками. В этом процессе важную роль играют боковые углеводные цепи и конфигурация их гликозидных связей.

Когда полисахариды, состоящие из остатков D-глюкозы, соединённых 1,4- и 1,6-α-гликозидными связями (например, крахмалы), попадают в желудочно-кишечный тракт, они частично расщепляются амилазами слюны и поджелудочной железы. Образовавшиеся моно- и дисахариды, а также продукты гидролиза крахмалов, всасываются в тонком кишечнике и являются доступными для организма углеводами. Другая часть полисахаридов, а именно НРПС, не гидролизуется амилазами и не всасывается в кровь, однако подвергается частичному или полному ферментативному расщеплению микрофлорой толстого кишечника.

После приема нерастворимые полисахариды (НРПС) образуют гель на поверхности слизистой желудочно-кишечного тракта, оказывающий обволакивающее и защитное действие (особенно высокой гелеобразующей способностью отличаются пектины), а также повышают вязкость содержимого желудка и кишечника, тормозя, тем самым, желудочно-кишечный транзит.

Накопление нерастворимых пищевых волокон (НРПС) и продуктов их бактериального расщепления в толстом кишечнике приводит к увеличению объёма стула, ускорению его прохождения и усиленному газообразованию. Благодаря гидрофилии НРПС увеличивается также и содержание

воды в стуле. В комплексе с антацидами пектины рекомендованы для лечения язв желудка и двенадцатиперстной кишки.

Исследования in vitro показали, что 4% раствор пектина обладает высокой бактерицидной активностью против стрептококков, синегнойной палочки, спорообразующих палочек, шигелл, клебсиелл, протея, кишечной палочки и стафилококков, при этом не нанося вреда лактобактериям. У пациентов с острыми кишечными инфекциями, получавших пектины наряду с другими лекарствами, симптомы токсикоза купировались быстрее. Предполагается, что антимикробное действие пектинов в организме связано с разрушением поверхностных структур и белков бактериальных клеток за счет их кислотного воздействия и подавлением адгезии бактерий к эпителиальным клеткам.

В связи с этим НРПС рассматривают так же и как пребиотики, стимулирующие рост кишечной микробиоты и ограничивающие размножение патогенных бактерий [15]. Поддержание оптимального состава кишечной микробиоты играет важнейшую роль, поскольку она выполняет ряд жизненно важных функций в организме человека:

1. Пищеварительная: ферментация некрахмальных полисахаридов (НПС), участие в обмене желчных кислот и синтезе ферментов.
2. Иммунная: участие в синтезе интерферонов и иммуноглобулина А.
3. Метаболическая: участие в биосинтезе витаминов В1, В2, В3, В5, В6, В12, К, аминокислот и короткоцепочечных жирных кислот.
4. Дезинтоксикационная: инактивация ксенобиотиков и лекарственных препаратов.
5. Регуляторная: регуляция функций иммунной, эндокринной и нервной систем [28; 35; 50].

Пребиотическое действие нерастворимых полисахаридов (НРПС) особенно важно при кишечных инфекциях, затяжное и хроническое течение которых в последнее время связывают с дисбактериозом и нерациональным использованием антибиотиков. Поэтому, в комплексной терапии кишечных инфекций, наряду с пробиотиками, содержащими бифидо- и лактобактерии, рекомендуется также применять пребиотики, включая НРПС.

Кишечная бактериальная ферментация нерастворимых полисахаридов (НРПС) приводит к образованию монокарбоновых кислот с 1–6 атомами углерода, включая уксусную, пропионовую и масляную (С2–С4). Соотношение этих кислот зависит от состава анаэробной микрофлоры и pH кишечного содержимого. У человека данные кислоты легко всасываются в

кишечнике и служат основным источником питания для эпителиальных клеток слизистой оболочки толстой кишки. Эти кислоты также стимулируют пролиферацию кишечного эпителия, ускоряя заживление повреждений слизистой. Дефицит бутирата, пропионата и ацетата может привести к острому или хроническому воспалению слизистой толстой кишки. Недостаточное потребление НРПС снижает продукцию жирных кислот и увеличивает риск расстройств толстого кишечника, что обуславливает необходимость дополнительного включения растительных полисахаридов в рацион.

Короткоцепочечные жирные кислоты, образующиеся при ферментации НРПС, улучшают микроциркуляцию крови в стенке толстой кишки и усиливают моторику кишечника. В экспериментальных моделях колита применение пектина, например, увеличивает высоту ворсинок и глубину крипт в тонкой кишке, а также повышает уровень энтероглюкагона в плазме. Защитный эффект НРПС в отношении рака толстой кишки также связывают с образованием монокарбоновых кислот. Масляная кислота, например, индуцирует дифференцировку и апоптоз раковых клеток толстой кишки, а также подавляет их пролиферацию.

Экспериментальные исследования на животных и клинические наблюдения в качестве одного из положительных эффектов действия НРПС демонстрируют снижение уровня холестерина в сыворотке крови, что, в частности, убедительно доказано для пектинов.

Механизм холестерин-снижающего действия нерастворимых полисахаридов (НРПС) объясняется их способностью связывать желчные кислоты в кишечнике. Желчные кислоты необходимы для всасывания холестерина в кровь. Связывание НРПС желчных кислот увеличивает их выведение из организма через кишечник и стимулирует их синтез в печени, что, в свою очередь, снижает синтез холестерина. Кроме того, короткоцепочечные жирные кислоты (пропионовая, уксусная и масляная), образующиеся при бактериальной ферментации НРПС, также ингибируют синтез холестерина в печени [9].

В прогрессировании атеросклероза и его осложнений большое значение имеют нарушения оптимального баланса в системе гемостаза. В частности, риск тромбоза увеличивается с повышением титров фибриногена и плотности формируемой им фибриновой сети. Было установлено, что длительное и регулярное употребление пектинов приводит к изменениям в фибриновой сети, которая становится более рыхлой, менее прочной и более восприимчивой к лизису. В связи с этим пектиновые добавки рекомендуются пациентам с гиперхолестеринемией и гиперфибриногенемией.

Большинство представителей полисахаридов высших растений стимулирует кроветворение [3]. Пектины растений, в частности, имеют большое стереохимическое сходство с протеогликанами и гликозаминогликанами клеток крови. При попадании в организм высших животных подобное сходство может иметь большое значение для регуляции процессов кроветворения. Показана способность пектиновых веществ к нормализации структуры кроветворных органов и гемограмм животных с различными видами анемии и облучения, стимулируя не только эритроидный, но и миелоидный, а также лимфоидный ростки кроветворения [11; 24].

Некрахмальные растительные полисахариды демонстрируют также и свойства иммуномодуляторов, увеличивая фагоцитарный индекс и способствуя пролиферации клеток селезенки и костного мозга, а также стимулируя цитотоксичность натуральных киллеров, активацию сети цитокинов и повышенное высвобождение гаммаинтерферона.

Нерастворимые полисахариды (НРПС) оказывают существенное влияние на функции иммунной системы. Это подтверждается, например, противоопухолевой активностью пектиновых полисахаридов. Данная активность обусловлена их взаимодействием со специфическими рецепторами на мембране макрофагов, что приводит к выработке цитокинов и фактора некроза опухолей. Также было показано, что НРПС, содержащие галактуронан, повышают экспрессию молекул главного комплекса гистосовместимости на мембранах опухолевых клеток. Это, в свою очередь, приводит к активации иммунных клеток, участвующих в противораковой защите.

Очевидно также, что для оптимальной иммуностимуляции существенное значение имеет и пребиотический эффект, вызываемый НРПС [5].

Показано, что применение пектиновых полисахаридов ускоряет выздоровление пациентов после облучения и воздействия цитотоксических агентов, а также демонстрирует выраженные гепатопротекторные эффекты при гепатите В. Препараты на основе пектинов и альгинатов рассматриваются как перспективные средства для выведения тяжелых металлов и радионуклидов из организма человека.

Таким образом, установлено, что пектины, преобладающие среди прочих НРПС в высших цветковых растениях, проявляют высокую биологическую активность при введении в организм животных и человека, стимулируя гемопоэз и иммунопоэз, активируя функции иммунной системы, повышая эффективность регенерации и оказывая противовоспалительное действие. Установлено также, что НРПС этого класса сти-

мулируют обмен веществ и активируют ферментные системы организма, оказывая тем самым адаптогенное действие [8; 16].

Семейство астровые (сложноцветные) Asteraceae Dumort. (Compositae Giseke) включает более 24000 видов, принадлежащих к 1400 родам, и является одним из крупнейших семейств растений. К нему принадлежит и календула лекарственная (Calendula officinalis) – однолетнее травянистое растение, название которого происходит от латинского «c*alendae*» (*первый день месяца* или *календарь* у древних римлян), народное наименование календулы – ноготки (семена по форме похожи на кошачий ноготок) [31]. Цветѐт с июня по сентябрь, плодоносит с конца июля, оранжево-желтые цветки растения образуют соцветия-корзинки. Наибольшей биологической активностью, которая сохраняется при высушивании, обладают только что распустившиеся цветы. Они проявляют антимикробные, регенерирующие, желчегонные, гемостатические, антисептические, противовоспалительные и обезболивающие свойства, а также ряд других полезных эффектов. Эти цветы используются для производства лекарственных средств в различных формах, таких как настойки, мази, отвары и экстракты [1; 4; 6; 19; 21; 33; 35].

Соцветия календуды содержат полисахариды (преимущественно пектины и целлюлоза), эфирные масла, флавоноиды, танины, каротиноиды (каротин, виолаксантин, рубиксантин, цитроксантин, флавохром, флавоксантин), сапонин (гликозид олеаноловой кислоты), фитостерин, хиноны, тритерпеновые гликозиды, слизи, календулин, смолы, яблочную и салициловую кислоту, железо, кальций, магний, калий, цинк и др. [2; 20; 29; 32].

Полисахариды календулы относятся к (I,3)-ά-D-галактанам с ответвлениями в положении С-6, боковые звенья представлены арабиноза-(1,3)-ά-арабинозой. В составе ПС календулы присутствуют также глюкоза, галактоза, рамноза, ксилоза и уроновые кислоты (глюкуроновая, галактуроновая, маннуроновая).

В соцветиях растения НРПС представлены: водорастворимыми полисахаридами (14,8%), пектиновыми веществами (9,7%), слизями (2,5%) и водонерастворимой гемицеллюлозой (5,0%). При этом в состав гидрофильных полисахаридов входит 31,3% сахаров восстанавливающего типа и 25,8% кислых сахаров [40; 46].

С учетом подобной высокой насыщенности различными БАВ соцветия календулы издавна находят наиболее широкое лечебное применение. В настоящее время календула занимает место в десятке наиболее востребованных в мире лекарственных растений [18].

В народной медицине сок из соцветий календулы применяется при отравлениях натощак. Настои и отвары календулы используются как потогонное средство при простудах, а также при ангинах, кожных заболеваниях (экземы), гнойных ранах, ожогах, обморожениях, сердечной недостаточности (особенно отеки и одышка), опухолях молочной железы и матки.

В гуманитарной и ветеринарной научной медицине препараты из календулы широко применяются как антисептическое и противовоспалительное средство в различных областях медицины, включая терапию, хирургию, гинекологию, оториноларингологию и дерматологию [55].

Календула лекарственная применяется непосредственно при травмах как местное противовоспалительное, заживляющее и антисептическое средство. Разработаны перевязочные материалы с использованием самого растения и его действующих веществ. Мази с экстрактом календулы эффективны для защиты от ультрафиолетового излучения, как антигеморрагическое средство и для облегчения симптомов острой лучевой болезни.

Ряд фитопрепаратов на основе календулы лекарственной включены в отечественную фармакопею:

- Настойка календулы: применяется как антисептик и противовоспалительное средство при порезах, ушибах, экземах; местно – для полосканий при воспалениях горла (тонзиллит, фарингит, ларингит) и слизистой оболочки рта (стоматит, гингивит, пародонтит).
- Календула (мазь и ректальные свечи): используется при порезах, ожогах, геморрое и эндоцервицитах.
- Калефлон (очищенный экстракт цветков календулы): применяется при язвенной болезни желудка, двенадцатиперстной кишки и хронических гастритах.

Цветки календулы также входят в состав других препаратов:

- Каферид: используется при лечении гипохромных анемий различной этиологии.
- Фитогепатол: травяной сбор при болезнях печени и желчных путей.
- Грудной сбор № 4, желчегонный №3, урологические сборы Элекасол и Фитонефрол: применяются при соответствующих заболеваниях.
- Жидкий экстракт календулы входит в комплексные препараты Ротокан, Алором и Фарингал, которые обладают противовоспалительным действием, гемостатическими свойствами и стимулируют регенерацию слизистых оболочек [55].

Настойка календулы в качестве бактерицидного и противовоспалительного средства применяется при ангине, порезах, ожогах, воспалительных

заболеваниях слизистой оболочки рта, а также в качестве седативного, спазмолитического, противогипертензивного, антиаритмического, гипогликемического и гепатопротекторного средства. Водно-спиртовые экстракты календулы обладают также и противоопухолевой активностью.

Показано, что этанольный экстракт из цветков календулы обладает иммуномодулирующим действием, причем, по некоторым данным формирование гуморального иммунного ответа стимулируют преимущественно полисахариды цветков.

Установлено, что НРПС цветков календулы стимулирует эритропоэз и лимфопоэз у здоровых животных, увеличивая массу тимуса и селезенки

Доказано также, что фитопрепараты соцветий календулы оказывают седативное и центрально-депрессивное действие, значительно подавляя активность двигательного типа, понижая тонус мышц и возбудительные рефлексы животных, делают их сонливыми и адинамичными.

Выводы

Большинство из многочисленных исследований физиологических эффектов, вызываемых биологически активными веществами, содержащимися в цветках календулы, до последнего времени проводилось с использованием спиртовых или водно-спиртовых экстрактов, причем, многие работы были посвящены преимущественно изучению биологической активности содержащихся в них полифенолов (флавоноидов) и каротиноидов. Накопление сведений о разнообразной и выраженной биологической активности НРПС, получаемых из других источников, стимулирует появление исследований, посвященных избирательному изучению особенностей химии и биологической активности полисахаридов цветков календулы.

В частности, учитывая отмеченное выше влияние НРПС на иммунный статус, гемопоэз, гемостаз, ЦНС, уровень гликемии, ритм сердечных сокращений и АД, следует ожидать заметного воздействия на течение экспериментального стресса и со стороны полисахаридов цветков календулы. При этом изучение адаптогенного эффекта в экспериментальных условиях у ряда лабораторных животных планируются в будущем.

Информация о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация о спонсорстве. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Список литературы

1. Апокина, Л. Ю., & Ершова, Е. Л. (2018). Влияние ксенобиотиков и фитоэкстрактов на показатели крови мышей в эксперименте. *Научный журнал*, (6), 29. EDN: https://elibrary.ru/XTIOZN
2. Афанасьева, П. В., & Куркина, А. В. (2015). Обоснование подходов к фармацевтическому анализу сырья и препаратов календулы лекарственной. *Научно-информационный межвузовский журнал «Аспирантский вестник Поволжья»*, (5–6), 223–226. EDN: https://elibrary.ru/WXOGXB
3. Белоглазова, К. Е., Рысмухамбетова, Г. Е., & Зирук, И. В. (2021). Динамика биохимических показателей крови крыс при добавлении в корма полисахаридов. В *Сборник материалов VI Международной научно-практической конференции «Приоритеты и научное обеспечение реализации государственной политики здорового питания в России»* (Орёл, 15–31 марта 2021 года, сс. 14–18). Орёл. EDN: https://elibrary.ru/BFIEBQ
4. Бойко, Т. В., Бузмакова, Н. А., & Варфоломеева, К. В. (2020). Календула лекарственная как источник биологически активных веществ для гуманитарной и ветеринарной медицины. В *Актуальные вопросы ветеринарии: материалы Международной научно-практической конференции, посвящённой 100-летию кафедры ветеринарной микробиологии, инфекционных и инвазионных болезней факультета ветеринарной медицины ИВМиБ* (Омск, 29 июня 2020 года, сс. 250–255). Омск: Омский государственный аграрный университет имени П. А. Столыпина.
5. Боков, Д. О., Сокуренко, М. С., & Бессонов, В. В. (2019). Качественная и количественная оценка растительных полисахаридов как пищевых и фармацевтических субстанций растительного и животного происхождения. В *Питание и здоровье* (сс. 6–8). EDN: https://elibrary.ru/WKFOQZ
6. Варфоломеева, К. В., Якоб, Д. А., Бойко, Т. В., & Лукша, Е. А. (2021). Фармакологические средства на основе календулы лекарственной (*Calendula officinalis* L.): перспективы применения в ветеринарной медицине. *Вестник Омского ГАУ*, (4), 81–101. DOI: https://doi.org/10.48136/2222-0364_2021_4_81. EDN: https://elibrary.ru/BYEHWC
7. Вычужанова, Е. А. (2015). Влияние хронического стресса на острую стресс-реакцию у крыс. *Наука и образование: проблемы, идеи, инновации*, (1), 9–11. EDN: https://elibrary.ru/UEACFX
8. Гришин, А. И. (2017). Фармакогностический анализ сырья лекарственных растений, обладающих противовоспалительными свойствами: календула лекарственная (*Calendula officinalis* L.), ромашка аптечная (*Chamomilla recutita* L.), тысячелистник обыкновенный (*Achillea millefolium* L.). *Бюлле-*

тень медицинских интернет-конференций, *7*(6), 1254. EDN: https://elibrary.ru/ZGCFGZ

9. Дадонова, Е. Д., & Грифель, Д. А. (2021). Влияние растительных полисахаридов на кровь и кроветворение. В *Инновационный дискурс развития современной науки и технологий* (сс. 229–233). EDN: https://elibrary.ru/QSZEWA
10. Денисов, Э. И., Пфаф, В. Ф., Степанян, И. В., & Горохова, С. Г. (2016). Сдвиг медико-биологической парадигмы: от гомеостаза к аллостазу. *Нейрокомпьютеры: разработка, применение*, (2), 16–21. EDN: https://elibrary.ru/VOKTAP
11. Ерзылева, Т. В. (2015). Влияние растительных полисахаридов на кровь и кроветворение в норме и при патологии. *Наука молодых (Eruditio Juvenium)*, (3), 97–102. EDN: https://elibrary.ru/UMFNDL
12. Есин, Р. Г., Есин, О. Р., & Хакимова, А. Р. (2020). Стресс-индуцированные расстройства. *Журнал неврологии и психиатрии им. С. С. Корсакова*, (5), 131–137. DOI: https://doi.org/10.17116/jnevro2020120051131. EDN: https://elibrary.ru/HWEYZZ
13. Иванова, Е. А. (2014). Современные представления о воздействии психоэмоционального стресса на органы иммунной системы (на примере пищеварительной системы крыс). *Академический журнал Западной Сибири*, *10*(2), 117–118. EDN: https://elibrary.ru/SBLWYD
14. Клыпа, Т. В., Орехова, М. С., & Забросаева, Л. И. (2015). Гипергликемия критических состояний. *Сахарный диабет*, (1), 33–41. DOI: https://doi.org/10.14341/DM2015133-41. EDN: https://elibrary.ru/TOVLHR
15. Кожевников, А. А., Раскина, К. В., Мартынова, Е. Ю., Тяхт, А. В., Перфильев, А. В., & Драпкина, О. М. (2017). Кишечная микробиота: современные представления о видовом составе, функциях и методах исследования. *РМЖ*, *25*(17), 1244–1247. EDN: https://elibrary.ru/ZPEWXZ
16. Копчекчи, К. А. (2023). Влияние полисахаридов на организм крыс. *В мире научных открытий* (сс. 504–507). EDN: https://elibrary.ru/MELOJX
17. Куприянов, Р. В., & Жданов, Р. И. (2014). Стресс и аллостаз: проблемы, перспективы и взаимосвязь. *Журнал высшей нервной деятельности им. И. П. Павлова*, *64*(1), 21. DOI: https://doi.org/10.7868/S0044467714010080. EDN: https://elibrary.ru/RUNUFT
18. Куркин, В. А., Авдеева, Е. В., Правдивцева, О. Е., Куркина, А. В., Варина, Н. Р., Стеняева, В. В., Цибина, А. С., & Первушкин, С. В. (2021). Научное обоснование использования лекарственных растений в оториноларингологии. *Наука и инновации в медицине*, *6*(2), 54–59. DOI: https://doi.org/10.35693/2500-1388-2021-6-2-54-59. EDN: https://elibrary.ru/INAJXQ

19. Куркин, В. А., Куркина, А. В., & Зайцева, Е. Н. (2016). Изучение диуретической активности препаратов на основе цветков календулы лекарственной. *Бюллетень сибирской медицины*, *15*(2), 51–57. DOI: https://doi.org/10.20538/1682-0363-2016-2-51-57. EDN: https://elibrary.ru/VZTZSB
20. Маланкина, Е. Л., Козловская, Л. Н., Биктимирова, Л. В., & Комарова, Е. Л. (2021). Комплексная оценка сортов календулы лекарственной по содержанию основных фармакологически значимых соединений. *Овощи России*, (1), 69–73. DOI: https://doi.org/10.18619/2072-9146-2021-1-69-73. EDN: https://elibrary.ru/PYONPC
21. Маткаримова, А. А., Турсунова, Ш. А., & Хамидов, Ш. А. (2016). Биоэкологические особенности некоторых лекарственных растений. *International Scientific Review*, (18), 32–34. EDN: https://elibrary.ru/WYBEJT
22. Маткина, О. В. (2014). Патогистологические изменения в тимусе и селезёнке неинбредных белых крыс при остром стрессе. *Пермский медицинский журнал*, *31*(1), 121–128. EDN: https://elibrary.ru/RXXDUN
23. Мирович, В. М., & Привалова, Е. Г. (2018). *Биологически активные вещества растений (полисахариды, эфирные масла, фенологликозиды, кумарины, флавоноиды): учебное пособие*. Иркутск: ИГМУ, 70 с.
24. Петрянкин, Ф. П., Лаврентьев, А. Ю., & Шерне, В. С. (2017). Влияние кормления на иммунный статус организма животных (научный обзор). *Вестник Чувашской государственной сельскохозяйственной академии*, (2), 46. EDN: https://elibrary.ru/ZWTRCT
25. Севрюкова, Г. А. (2022). Реостаз, аллостаз и аллостатическая нагрузка: что понимается под этими терминами? *Международный научно-исследовательский журнал*, (10), 124. DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.124.22. EDN: https://elibrary.ru/OUVLSX
26. Селье, Г. (1972). *На уровне целого организма* (пер. с англ.). Москва: Наука, 121 с.
27. Селье, Г. (1960). *Очерки об адаптационном синдроме*. Москва: Медгиз, 254 с.
28. Троицкий, М. С., Токарев, А. Р., & Гладких, П. Г. (2016). Возможности коррекции психоэмоционального стресса (краткий обзор литературы). В *Перспективы вузовской науки: сборник трудов* (Часть 2, сс. 66–77). Тула. EDN: https://elibrary.ru/WYIZLT
29. Хазиева, Ф. М., Цыганок, С. И., Саматадзе, Т. Е., & Морозов, А. И. (2019). Сортовая специфика накопления макро- и микроэлементов в цветках *Calendula officinalis* L. и их цитогенетическая изменчивость. *Агрохимический вестник*, (2), 58–61. DOI: https://doi.org/10.24411/0235-2516-2019-10029. EDN: https://elibrary.ru/VGPGRQ

30. Черных, И. В., Кириченко, Е. Е., Щулькин, А. В., Попова, Н. М., Котлярова, А. А., & Якушева, Е. Н. (2018). Возможности применения некрахмальных полисахаридов растительного происхождения в клинической практике. *Российский медико-биологический вестник имени академика И. П. Павлова*, *26*(2), 305–316. DOI: https://doi.org/10.23888/PAVLOVJ2018262305-316. EDN: https://elibrary.ru/OVIRWR
31. Шаталова, Т. А., Сергеева, Е. О., & Мичник, Л. А. (2017). Изучение фармакологического действия стабилизированных водных извлечений ромашки, тысячелистника, календулы, крушины. *Журнал научных статей «Здоровье и образование в XXI веке»*, *19*(10), 317–320. EDN: https://elibrary.ru/ZATPGJ
32. Швыдкий, В. О., Смирнова, А. Н., Волков, В. А., & Шишкина, Л. Н. (2020). УФ-спектрометрия и состав липидов водно-пропиленгликолевых экстрактов ряда лекарственных растений. *Химия растительного сырья*, (1). DOI: https://doi.org/10.14258/jcprm.2020016115. EDN: https://elibrary.ru/KZRCKD
33. Шереметьева, А. С., Дурнова, Н. А., & Райкова, С. В. (2017). Сравнительный анализ антимикробной активности настоев календулы лекарственной (*Calendula officinalis* L.) и ромашки аптечной (*Chamomilla recutita* L.). *Бюллетень ботанического сада Саратовского государственного университета*, *15*(3), 41–49. DOI: https://doi.org/10.18500/1682-1637-2017-15-3-41-49. EDN: https://elibrary.ru/ZUCHUF
34. Эбзеева, Е. Ю., & Полякова, О. А. (2022). Стресс и стресс-индуцированные расстройства. *Медицинский совет*, *16*(2), 127–133. DOI: https://doi.org/10.21518/2079-701X-2022-16-2-127-133. EDN: https://elibrary.ru/AWUNWO
35. Ahlawat, S., & Sharma, K. K. (2021). Gut-organ axis: a microbial outreach and networking. *Letters in Applied Microbiology*, *72*(6), 636–668.
36. Ahmadi, N., Hajsadeghi, F., Yehuda, R., Anderson, N., Garfield, D., Ludmer, C., & Vaidya, N. (2015). Traumatic brain injury, coronary atherosclerosis and cardiovascular mortality. *Brain Injury*, *29*(13–14), 1635–1641.
37. Chakravarty, S., Pathak, S. S., Maitra, S., Khandelwal, N., Karisetty, B. C., & Kumar, A. (2014). Epigenetic regulatory mechanisms in stress-induced behavior. *International Review of Neurobiology*, *115*, 117–154. DOI: https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801311-3.00004-4. EDN: https://elibrary.ru/USNZIZ
38. Cho, C. W., Han, C. J., Rhee, Y. K., Lee, Y. C., Shin, K. S., Shin, J. S., Shin, J.-S., & Lee, K.-T., Hong, H.-D. (2015). Cheonggukjang polysaccharides enhance immune activities and prevent cyclophosphamide-induced immunosuppression. *International Journal of Biological Macromolecules*, *72*, 519–525.
39. Cool, J., & Zappetti, D. (2019). The physiology of stress. В *Medical Student Well-Being* (eds. Zappetti, D., & Avery, J., pp. 1–16). Cham: Springer.

40. Elgindi, M., Abdalkhalik, S., Melek, F., Hassan, M., & Abdelaziz, H. (2015). Saponins isolated from *Polyscias guilfoylei* F. Araliaceae. *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*, *6*(3), 545–549. EDN: https://elibrary.ru/WRBEFP
41. Fava, G. A., Cosci, F., & Sonino, N. (2017). Current psychosomatic practice. *Psychotherapy and Psychosomatics*, *86*(1), 13–30. DOI: https://doi.org/10.1159/000448856
42. Guan, L., Collet, J. P., Mazowita, G., & Claydon, V. E. (2018). Autonomic nervous system and stress to predict secondary ischemic events after transient ischemic attack or minor stroke: possible implications of heart rate variability. *Frontiers in Neurology*. DOI: https://doi.org/10.3389/fneur.2018.00090
43. Jiao, R., Liu, Y., Gao, H., Xiao, J., & So, K. F. (2016). The anti-oxidant and antitumor properties of plant polysaccharides. *The American Journal of Chinese Medicine*, *44*(3), 463–488. DOI: https://doi.org/10.1142/S0192415X16500269. EDN: https://elibrary.ru/WTRFAV
44. Kernan, W. N., Ovbiagele, B., Black, H. R., Bravata, D. M., Chimowitz, M. I., Ezekowitz, M. D., et al. (2014). Guidelines for the prevention of stroke in patients with stroke and transient ischemic attack: a guideline for healthcare professionals from the American Heart Association/American Stroke Association. *Stroke*, *45*(7), 2160–2236. DOI: https://doi.org/10.1161/STR.0000000000000024. EDN: https://elibrary.ru/UPTCXZ
45. McEwen, B. S., & Karatsoreos, I. N. (2020). What is stress? B *Stress Challenges and Immunity in Space* (ed. Choukir, A., pp. 19–42). Cham: Springer.
46. Jan, N., Iqbal Andrabi, K., & Javed, R. (2017). *Calendula officinalis*. An important medicinal plant with potential biological properties. *Proceedings of the Indian National Science Academy*, *83*(4), 769–787. DOI: https://doi.org/10.16943/ptinsa/2017/49126
47. Pang, P., Wang, F., & Zhang, L. (2018). Dose matters: direct killing or immunoregulatory effects of natural polysaccharides in cancer treatment. *Carbohydrate Polymers*, *195*, 243–256. DOI: https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.04.100. EDN: https://elibrary.ru/SGYMFB
48. Pomatto, L. C. D., & Davies, K. J. A. (2018). Adaptive homeostasis and the free radical theory of ageing. *Free Radical Biology and Medicine*, *124*, 420–430. DOI: https://doi.org/10.1016/j.freeradbiomed.2018.06.016
49. Sarjan, H. N., Divyashree, S., & Yajurvedi, H. N. (2017). The protective effect of the *Vacha* rhizome extract on chronic stress-induced immunodeficiency in rats. *Pharmaceutical Biology*, *55*, 1358–1367. DOI: https://doi.org/10.1080/13880209.2017.1301495. EDN: https://elibrary.ru/YGDOET

50. Shi, J. J., Zhang, J. G., Sun, Y. H., Qu, J., Li, L., Prasad, C., & Wei, Z.-J. (2016). Physicochemical properties and antioxidant activities of polysaccharides sequentially extracted from peony seed dreg. *International Journal of Biological Macromolecules*, *9*, 23–30.
51. Srinivasan, S., Loganathan, S., Wankhar, W., Sheeladevi, R., & Ravindran, R. (2016). Stress effect on humoral and cell-mediated immune response: indispensable part of corticosterone and cytokine in neutrophil function. *Trials in Vaccinology*, (5), 61–70.
52. Stankiewicz, A. M., Swiergiel, A. H., & Lisowski, P. (2013). Epigenetics of stress adaptations in the brain. *Brain Research Bulletin*, *98*, 76–92. DOI: https://doi.org/10.1016/j.brainresbull.2013.07.003. EDN: https://elibrary.ru/RMDCGT
53. Sterling, P. (2012). Allostasis: a model of predictive regulation. *Physiology & Behavior*, *106*, 5–15.
54. Sterling, P., & Eyer, J. (1988). Allostasis: a new paradigm to explain arousal pathology. B *Handbook of Life Stress, Cognition and Health* (eds. Fisher, S., & Reason, J., pp. 629–649). New York: John Wiley & Sons.
55. Sytar, O., Zivcak, M., Brestic, M., Rauh, C., & Brestic, M. (2018). Comparative analysis of bioactive phenolic compounds composition from 26 medicinal plants. *Saudi Journal of Biological Sciences*, *25*(4), 631–641. URL: http://europepmc.org/backend/ptpmcrender.cgi?accid=PMC5937015&blobtype=pdf. DOI: https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2016.01.036. EDN: https://elibrary.ru/YBFIKD
56. Von Känel, R. (2015). Acute mental stress and hemostasis: when physiology becomes vascular harm. *Thrombosis Research*, *135*(1, Suppl.), S52–S55.
57. Wang, J., Li, W., Huang, X., Liu, Y., Li, Q., Zheng, Z., & Wang, K. (2017). A polysaccharide from *Lentinus edodes* inhibits human colon cancer cell proliferation and suppresses tumor growth in athymic nude mice. *Oncotarget*, (8), 610–623. DOI: https://doi.org/10.18632/oncotarget.13481. EDN: https://elibrary.ru/YZXEQH
58. Wethington, E. (2016). Life events scale. B *Stress: Concepts, Cognition, Emotion, and Behavior* (pp. 103–108). DOI: https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800951-2.00012-1

References

1. Apokina, L. Yu., & Ershova, E. L. (2018). The effect of xenobiotics and phytoextracts on blood parameters in mice in an experiment. *Scientific Journal*, *(6)*, 29. EDN: https://elibrary.ru/XTIOZN
2. Afanasyeva, P. V., & Kurkina, A. V. (2015). Rationale for approaches to pharmaceutical analysis of raw materials and preparations of calendula of-

ficinalis. *Postgraduate Bulletin of the Volga Region*, *(5–6)*, 223–226. EDN: https://elibrary.ru/WXOGXB

3. Beloglazova, K. E., Rysmukhambetova, G. E., & Ziruk, I. V. (2021). Dynamics of biochemical blood parameters in rats with polysaccharides added to feed. In *Proceedings of the VI International Scientific and Practical Conference "Priorities and Scientific Support for the Implementation of the State Policy of Healthy Nutrition in Russia"* (Oryol, March 15–31, 2021, pp. 14–18). Oryol. EDN: https://elibrary.ru/BFIEBQ
4. Boyko, T. V., Buzmakova, N. A., & Varfolomeyeva, K. V. (2020). Calendula officinalis as a source of biologically active substances for human and veterinary medicine. In *Current Issues in Veterinary Medicine: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference Dedicated to the 100th Anniversary of the Department of Veterinary Microbiology, Infectious and Invasive Diseases, Faculty of Veterinary Medicine, IVMiB* (Omsk, June 29, 2020, pp. 250–255). Omsk: Omsk State Agrarian University named after P. A. Stolypin.
5. Bokov, D. O., Sokurenko, M. S., & Bessonov, V. V. (2019). Qualitative and quantitative assessment of plant polysaccharides as food and pharmaceutical substances of plant and animal origin. In *Nutrition and Health* (pp. 6–8). EDN: https://elibrary.ru/WKFOQZ
6. Varfolomeyeva, K. V., Yakob, D. A., Boyko, T. V., & Luksha, E. A. (2021). Pharmacological agents based on calendula officinalis (Calendula officinalis L.): prospects for use in veterinary medicine. *Bulletin of Omsk SAU*, *(4)*, 81–101. https://doi.org/10.48136/2222-0364_2 prepared_2021_4_81. EDN: https://elibrary.ru/BYEHWC
7. Vychuzhanova, E. A. (2015). The effect of chronic stress on acute stress response in rats. *Science and Education: Problems, Ideas, Innovations*, *(1)*, 9–11. EDN: https://elibrary.ru/UEACFX
8. Grishin, A. I. (2017). Pharmacognostic analysis of medicinal plant raw materials with anti-inflammatory properties: calendula officinalis (Calendula officinalis L.), chamomile (Chamomilla recutita L.), yarrow (Achillea millefolium L.). *Bulletin of Medical Internet Conferences*, *7*(6), 1254. EDN: https://elibrary.ru/ZGCFGZ
9. Dadonova, E. D., & Grifel, D. A. (2021). The effect of plant polysaccharides on blood and hematopoiesis. In *Innovative Discourse of Modern Science and Technology Development* (pp. 229–233). EDN: https://elibrary.ru/QSZEWA
10. Denisov, E. I., Pfaf, V. F., Stepanyan, I. V., & Gorokhova, S. G. (2016). Shift in biomedical paradigm: from homeostasis to allostasis. *Neurocomputers: Development, Application*, *(2)*, 16–21. EDN: https://elibrary.ru/VOKTAP

11. Erzyleva, T. V. (2015). The effect of plant polysaccharides on blood and hematopoiesis in health and disease. *Science of the Young (Eruditio Juvenium)*, *(3)*, 97–102. EDN: https://elibrary.ru/UMFNDL
12. Esin, R. G., Esin, O. R., & Khakimova, A. R. (2020). Stress-induced disorders. *Journal of Neurology and Psychiatry named after S. S. Korsakov*, *(5)*, 131–137. https://doi.org/10.17116/jnevro2020120051131. EDN: https://elibrary.ru/HWEYZZ
13. Ivanova, E. A. (2014). Modern concepts of the impact of psychoemotional stress on immune system organs (using the example of the digestive system in rats). *Academic Journal of Western Siberia*, *10*(2), 117–118. EDN: https://elibrary.ru/SBLWYD
14. Klypa, T. V., Orekhova, M. S., & Zabrosaeva, L. I. (2015). Hyperglycemia in critical conditions. *Diabetes Mellitus*, *(1)*, 33–41. https://doi.org/10.14341/DM2015133-41. EDN: https://elibrary.ru/TOVLHR
15. Kozhevnikov, A. A., Raskina, K. V., Martynova, E. Yu., Tyakht, A. V., Perfiliev, A. V., & Drapkina, O. M. (2017). Gut microbiota: modern concepts of species composition, functions, and research methods. *RMJ*, *25*(17), 1244–1247. EDN: https://elibrary.ru/ZPEWXZ
16. Kopchekchi, K. A. (2023). The effect of polysaccharides on the rat organism. In *In the World of Scientific Discoveries* (pp. 504–507). EDN: https://elibrary.ru/MELOJX
17. Kupriyanov, R. V., & Zhdanov, R. I. (2014). Stress and allostasis: problems, prospects, and interrelations. *I. P. Pavlov Journal of Higher Nervous Activity*, *64*(1), 21. https://doi.org/10.7868/S0044467714010080. EDN: https://elibrary.ru/RUNUFT
18. Kurkin, V. A., Avdeeva, E. V., Pravdivtseva, O. E., Kurkina, A. V., Varina, N. R., Stenyaeva, V. V., Tsibina, A. S., & Pervushkin, S. V. (2021). Scientific rationale for the use of medicinal plants in otorhinolaryngology. *Science and Innovations in Medicine*, *6*(2), 54–59. https://doi.org/10.35693/2500-1388-2021-6-2-54-59. EDN: https://elibrary.ru/INAJXQ
19. Kurkin, V. A., Kurkina, A. V., & Zaitseva, E. N. (2016). Study of diuretic activity of preparations based on calendula officinalis flowers. *Bulletin of Siberian Medicine*, *15*(2), 51–57. https://doi.org/10.20538/1682-0363-2016-2-51-57. EDN: https://elibrary.ru/VZTZSB
20. Malankina, E. L., Kozlovskaya, L. N., Biktimirova, L. V., & Komarova, E. L. (2021). Comprehensive assessment of calendula officinalis cultivars by content of major pharmacologically significant compounds. *Vegetables of Russia*, *(1)*, 69–73. https://doi.org/10.18619/2072-9146-2021-1-69-73. EDN: https://elibrary.ru/PYONPC

21. Matkarimova, A. A., Tursunova, Sh. A., & Khamidov, Sh. A. (2016). Bioecological features of some medicinal plants. *International Scientific Review*, *(18)*, 32–34. EDN: https://elibrary.ru/WYBEJT
22. Matkina, O. V. (2014). Pathohistological changes in thymus and spleen of non-inbred white rats under acute stress. *Perm Medical Journal*, *31*(1), 121–128. EDN: https://elibrary.ru/RXXDUN
23. Mirovich, V. M., & Privalova, E. G. (2018). *Biologically active substances of plants (polysaccharides, essential oils, phenolglycosides, coumarins, flavonoids): textbook*. Irkutsk: ISMU. 70 pp.
24. Petryankin, F. P., Lavrentyev, A. Yu., & Sherne, V. S. (2017). The effect of feeding on the immune status of animal organisms (scientific review). *Bulletin of the Chuvash State Agricultural Academy*, *(2)*, 46. EDN: https://elibrary.ru/ZWTRCT
25. Sevryukova, G. A. (2022). Reostasis, allostasis, and allostatic load: what is meant by these terms? *International Research Journal*, *(10)*, 124. https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.124.22. EDN: https://elibrary.ru/OUVLSX
26. Selye, H. (1972). *At the level of the whole organism* (Transl. from English). Moscow: Nauka. 121 pp.
27. Selye, H. (1960). *Essays on the adaptation syndrome*. Moscow: Medgiz. 254 pp.
28. Troitsky, M. S., Tokarev, A. R., & Gladkikh, P. G. (2016). Possibilities of psychoemotional stress correction (brief literature review). In *Prospects of University Science: Collection of Works* (Part 2, pp. 66–77). Tula. EDN: https://elibrary.ru/WYIZLT
29. Khazieva, F. M., Tsyganok, S. I., Samatadze, T. E., & Morozov, A. I. (2019). Varietal specificity of macro- and microelement accumulation in calendula officinalis L. flowers and their cytogenetic variability. *Agrochemical Bulletin*, *(2)*, 58–61. https://doi.org/10.24411/0235-2516-2019-10029. EDN: https://elibrary.ru/VGPGRQ
30. Chernykh, I. V., Kirichenko, E. E., Shchulkin, A. V., Popova, N. M., Kotlyarova, A. A., & Yakusheva, E. N. (2018). Possibilities of using non-starch plant-derived polysaccharides in clinical practice. *I. P. Pavlov Russian Medical Biological Herald*, *26*(2), 305–316. https://doi.org/10.23888/PAVLOVJ2018262305-316. EDN: https://elibrary.ru/OVIRWR
31. Shatalova, T. A., Sergeeva, E. O., & Michnik, L. A. (2017). Study of the pharmacological action of stabilized aqueous extracts of chamomile, yarrow, calendula, and buckthorn. *Journal of Scientific Articles "Health and Education in the XXI Century"*, *19*(10), 317–320. EDN: https://elibrary.ru/ZATPGJ

32. Shvydkiy, V. O., Smirnova, A. N., Volkov, V. A., & Shishkina, L. N. (2020). UV spectrometry and lipid composition of water-propylene glycol extracts of several medicinal plants. *Chemistry of Plant Raw Material*, *(1)*. https://doi.org/10.14258/jcprm.2020016115. EDN: https://elibrary.ru/KZRCKD
33. Sheremetyeva, A. S., Durnova, N. A., & Raikova, S. V. (2017). Comparative analysis of antimicrobial activity of infusions of calendula officinalis (Calendula officinalis L.) and chamomile (Chamomilla recutita L.). *Bulletin of the Botanical Garden of Saratov State University*, *15*(3), 41–49. https://doi.org/10.18500/1682-1637-2017-15-3-41-49. EDN: https://elibrary.ru/ZUCHUF
34. Ebzeeva, E. Yu., & Polyakova, O. A. (2022). Stress and stress-induced disorders. *Medical Council*, *16*(2), 127–133. https://doi.org/10.21518/2079-701X-2022-16-2-127-133. EDN: https://elibrary.ru/AWUNWO
35. Ahlawat, S., & Sharma, K. K. (2021). Gut-organ axis: a microbial outreach and networking. *Letters in Applied Microbiology*, *72*(6), 636–668.
36. Ahmadi, N., Hajsadeghi, F., Yehuda, R., Anderson, N., Garfield, D., Ludmer, C., & Vaidya, N. (2015). Traumatic brain injury, coronary atherosclerosis and cardiovascular mortality. *Brain Injury*, *29*(13–14), 1635–1641.
37. Chakravarty, S., Pathak, S. S., Maitra, S., Khandelwal, N., Karisetty, B. C., & Kumar, A. (2014). Epigenetic regulatory mechanisms in stress-induced behavior. *International Review of Neurobiology*, *115*, 117–154. DOI: https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801311-3.00004-4. EDN: https://elibrary.ru/USNZIZ
38. Cho, C. W., Han, C. J., Rhee, Y. K., Lee, Y. C., Shin, K. S., Shin, J. S., Shin, J.-S., & Lee, K.-T., Hong, H.-D. (2015). Cheonggukjang polysaccharides enhance immune activities and prevent cyclophosphamide-induced immunosuppression. *International Journal of Biological Macromolecules*, *72*, 519–525.
39. Cool, J., & Zappetti, D. (2019). The physiology of stress. B *Medical Student Well-Being* (eds. Zappetti, D., & Avery, J., pp. 1–16). Cham: Springer.
40. Elgindi, M., Abdalkhalik, S., Melek, F., Hassan, M., & Abdelaziz, H. (2015). Saponins isolated from *Polyscias guilfoylei* F. Araliaceae. *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*, *6*(3), 545–549. EDN: https://elibrary.ru/WRBEFP
41. Fava, G. A., Cosci, F., & Sonino, N. (2017). Current psychosomatic practice. *Psychotherapy and Psychosomatics*, *86*(1), 13–30. DOI: https://doi.org/10.1159/000448856
42. Guan, L., Collet, J. P., Mazowita, G., & Claydon, V. E. (2018). Autonomic nervous system and stress to predict secondary ischemic events after

transient ischemic attack or minor stroke: possible implications of heart rate variability. *Frontiers in Neurology*. DOI: https://doi.org/10.3389/fneur.2018.00090

43. Jiao, R., Liu, Y., Gao, H., Xiao, J., & So, K. F. (2016). The anti-oxidant and antitumor properties of plant polysaccharides. *The American Journal of Chinese Medicine*, *44*(3), 463–488. DOI: https://doi.org/10.1142/S0192415X16500269. EDN: https://elibrary.ru/WTRFAV
44. Kernan, W. N., Ovbiagele, B., Black, H. R., Bravata, D. M., Chimowitz, M. I., Ezekowitz, M. D., et al. (2014). Guidelines for the prevention of stroke in patients with stroke and transient ischemic attack: a guideline for healthcare professionals from the American Heart Association/American Stroke Association. *Stroke*, *45*(7), 2160–2236. DOI: https://doi.org/10.1161/STR.0000000000000024. EDN: https://elibrary.ru/UPTCXZ
45. McEwen, B. S., & Karatsoreos, I. N. (2020). What is stress? B *Stress Challenges and Immunity in Space* (ed. Choukir, A., pp. 19–42). Cham: Springer.
46. Jan, N., Iqbal Andrabi, K., & Javed, R. (2017). *Calendula officinalis*. An important medicinal plant with potential biological properties. *Proceedings of the Indian National Science Academy*, *83*(4), 769–787. DOI: https://doi.org/10.16943/ptinsa/2017/49126
47. Pang, P., Wang, F., & Zhang, L. (2018). Dose matters: direct killing or immunoregulatory effects of natural polysaccharides in cancer treatment. *Carbohydrate Polymers*, *195*, 243–256. DOI: https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.04.100. EDN: https://elibrary.ru/SGYMFB
48. Pomatto, L. C. D., & Davies, K. J. A. (2018). Adaptive homeostasis and the free radical theory of ageing. *Free Radical Biology and Medicine*, *124*, 420–430. DOI: https://doi.org/10.1016/j.freeradbiomed.2018.06.016
49. Sarjan, H. N., Divyashree, S., & Yajurvedi, H. N. (2017). The protective effect of the *Vacha* rhizome extract on chronic stress-induced immunodeficiency in rats. *Pharmaceutical Biology*, *55*, 1358–1367. DOI: https://doi.org/10.1080/13880209.2017.1301495. EDN: https://elibrary.ru/YGDOET
50. Shi, J. J., Zhang, J. G., Sun, Y. H., Qu, J., Li, L., Prasad, C., & Wei, Z.-J. (2016). Physicochemical properties and antioxidant activities of polysaccharides sequentially extracted from peony seed dreg. *International Journal of Biological Macromolecules*, *9*, 23–30.
51. Srinivasan, S., Loganathan, S., Wankhar, W., Sheeladevi, R., & Ravindran, R. (2016). Stress effect on humoral and cell-mediated immune response: indispensable part of corticosterone and cytokine in neutrophil function. *Trials in Vaccinology*, (5), 61–70.

52. Stankiewicz, A. M., Swiergiel, A. H., & Lisowski, P. (2013). Epigenetics of stress adaptations in the brain. *Brain Research Bulletin*, *98*, 76–92. DOI: https://doi.org/10.1016/j.brainresbull.2013.07.003. EDN: https://elibrary.ru/RMDCGT
53. Sterling, P. (2012). Allostasis: a model of predictive regulation. *Physiology & Behavior*, *106*, 5–15.
54. Sterling, P., & Eyer, J. (1988). Allostasis: a new paradigm to explain arousal pathology. B *Handbook of Life Stress, Cognition and Health* (eds. Fisher, S., & Reason, J., pp. 629–649). New York: John Wiley & Sons.
55. Sytar, O., Zivcak, M., Brestic, M., Rauh, C., & Brestic, M. (2018). Comparative analysis of bioactive phenolic compounds composition from 26 medicinal plants. *Saudi Journal of Biological Sciences*, *25*(4), 631–641. URL: http://europepmc.org/backend/ptpmcrender.cgi?accid=PMC5937015&blobtype=pdf. DOI: https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2016.01.036. EDN: https://elibrary.ru/YBFIKD
56. Von Känel, R. (2015). Acute mental stress and hemostasis: when physiology becomes vascular harm. *Thrombosis Research*, *135*(1, Suppl.), S52–S55.
57. Wang, J., Li, W., Huang, X., Liu, Y., Li, Q., Zheng, Z., & Wang, K. (2017). A polysaccharide from *Lentinus edodes* inhibits human colon cancer cell proliferation and suppresses tumor growth in athymic nude mice. *Oncotarget*, (8), 610–623. DOI: https://doi.org/10.18632/oncotarget.13481. EDN: https://elibrary.ru/YZXEQH
58. Wethington, E. (2016). Life events scale. B *Stress: Concepts, Cognition, Emotion, and Behavior* (pp. 103–108). DOI: https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800951-2.00012-1

ВКЛАД АВТОРОВ

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку статьи для публикации.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

The authors contributed equally to this article.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Ванина Дарья Сергеевна, ассистент кафедры патофизиологии
Рязанский государственный медицинский университет имени академика И. П. Павлова
ул. Высоковольтная, 9, г. Рязань, 390026, Российская Федерация
sirotkina.dashulya@inbox.ru

Бяловский Юрий Юльевич, д.м.н., профессор, заведующий кафедрой патофизиологии
Рязанский государственный медицинский университет имени академика И. П. Павлова
ул. Высоковольтная, 9, г. Рязань, 390026, Российская Федерация
b_uu@mail.ru

Сычев Игорь Анатольевич, д.б.н., доцент кафедры общей химии
Рязанского государственного медицинского университета имени академика И.П. Павлова
ул. Высоковольтная, 9, г. Рязань, 390026, Российская Федерация
i.sytchev@rzgmu.ru

Буржинский Андрей Анатольевич, к.м.н., доцент кафедры гистологии, патологической анатомии и медицинской генетики
Рязанский государственный медицинский университет имени академика И. П. Павлова
ул. Высоковольтная, 9, г. Рязань, 390026, Российская Федерация
andreyhistology@gmail.com

Воронина Раиса Константиновна, старший преподаватель кафедры гистологии, патологической анатомии и медицинской генетики
Рязанский государственный медицинский университет имени академика И. П. Павлова
ул. Высоковольтная, 9, г. Рязань, 390026, Российская Федерация
raisa.voronina58@yandex.ru

DATA ABOUT THE AUTHORS

Darya S. Vanina, Assistant of the Department of Pathophysiology
Ryazan State Medical University named after Academician I. P. Pavlov
9, Vysokovoltnaya Str., Ryazan, 390026, Russian Federation
sirotkina.dashulya@inbox.ru
ORCID: https://orcid.org/0009-0009-0690-3300

Yuri Yu. Byalovsky, MD, Professor, Head of the Department of Pathophysiology
Ryazan State Medical University named after Academician I. P. Pavlov
9, Vysokovoltnaya Str., Ryazan, 390026, Russian Federation

b_uu@mail.ru
ORCID: https://orcid org/0000-0002-6769-8277

Igor A. Sychev, Doctor of Biological Sciences, Associate Professor of the Department of General Chemistry
Ryazan State Medica lUniversity named after Academician I. P. Pavlov
9, Vysokovoltnaya Str., Ryazan, 390026, Russian Federation
i.sytchev@rzgmu.ru
ORCID: https://orcid.org/0009-0003-3684-8775

Andrey A. Burzhinsky, PhD, Associate Professor of the Department of Histology, Pathological Anatomy and Medical Genetics
Ryazan State Medical University named after Academician I. P. Pavlov
9, Vysokovoltnaya Str., Ryazan, 390026, Russian Federation
andreyhistology@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0009-0002-9398-4741

Raisa K. Voronina, Senior Lecturer at the Department of Histology, Pathological Anatomy and Medical Genetics
Ryazan State Medical University named after Academician I. P. Pavlov
9, Vysokovoltnaya Str., Ryazan, 390026, Russian Federation
raisa.voronina58@yandex.ru
ORCID: https://orcid.org/0009-0004-0279-8252

Поступила 05.11.2024 Received 05.11.2024
После рецензирования 15.01.2025 Revised 15.01.2025
Принята 30.01.2025 Accepted 30.01.2025

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-4-1185 **EDN: DTKTIB**
УДК 612.1:616.151:636.034

Научные обзоры

ФИЗИОТЕРАПИЯ ИНСОМНИЙ: СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ (ОБЗОР)

О.Л. Кирюхин, Л.Е. Дерягина, С.В. Булатецкий, Е.П. Глушкова

Аннотация

Обоснование. Старение населения, рост информационной и психоэмоциональной нагрузки, ухудшение экологии привело к тому, что жалобы на расстройства ночного сна всё чаще упоминаются при обращении больных за медицинской помощью. Результаты последних исследования показали, что инсомния является фактором риска сердечно-сосудистых осложнений, оказывает негативное влияние на течение сопутствующих заболеваний, повышая риск их обострения и смертности. Приём лекарственных препаратов связан с рядом проблем: формирование зависимости, снижение когнитивной функции, нарушения дневного функционирования и др. Поэтому использование немедикаментозных методов лечения инсомний имеет большие перспективы.

Материалы и методы. Материалы подготовлены на основе анализа российских и зарубежных научных публикаций, метаанализов и систематических обзоров исследований, в которых физиотерапия использовалась, как немедикаментозный способ лечения инсомнии. Методы физиотерапии рассмотрены в контексте доказательной медицины.

Результаты. Рассмотренные методики существенно расширяют представления о немедикаментозной терапии инсомний, что может использоваться для коррекции синдрома инсомнии и в комплексном лечении многих заболеваний. Физические факторы в лечении инсомний могут применяться как самостоятельно, так и в составе реабилитационных программ по лечению других заболеваний.

Заключение. В последних научных исследованиях всё больше появляется информации о влиянии расстройств сна на течение тех или иных заболеваний. Терапевтические возможности как правило ограничены из-за отсутствия в настоящее время безопасных и эффективных фармакологических средств для

длительного применения. В статье обобщен современный опыт применения физиотерапии в лечении инсомнии.

Ключевые слова: обзор; инсомнии; физиотерапия; транскраниальная электротерапия; магнитотерапия; фототерапия; водолечение; точечный массаж; классический массаж; ароматерапия

Для цитирования. Кирюхин, О. Л., Дерягина, Л. Е., Булатецкий, С. В., & Глушкова, Е. П. (2025). Физиотерапия инсомний: современные представления (обзор). *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(4), 611-658. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-4-1185

Scientific Reviews

PHYSIOTHERAPY FOR INSOMNIAS: MODERN VIEWS (REVIEW)

O.L. Kiryukhin, L.E. Deryagina, S.V. Bulatetsky, E.P. Glushkova

Abstract

Background. The aging of the population, the growth of information and psycho-emotional load, the deterioration of the environment have led to the fact that complaints about night sleep disorders are increasingly mentioned when patients seek medical help. The results of recent studies have shown that insomnia is a risk factor for cardiovascular complications, has a negative impact on the course of concomitant diseases, increasing the risk of their exacerbation and mortality. Taking medications is associated with a number of problems: the formation of addiction, a decrease in cognitive function, impaired daytime functioning, etc.

Materials and methods. The materials were prepared on the basis of the analysis of Russian and foreign scientific publications, meta-analyses and systematic reviews of studies in which physiotherapy was used as a non-drug method of treating insomnia. Physiotherapy methods are considered in the context of evidence-based medicine.

Results. The considered methods significantly expand the understanding of non-drug therapy of insomnia, which can be used to correct insomnia syndrome and in the complex treatment of many diseases. Physical factors in the treatment of insomnias can be used both independently and as part of rehabilitation programs for the treatment of other diseases.

Conclusion. In the latest scientific studies, there is more and more information about the impact of sleep disorders on the course of certain diseases. Therapeutic

options are generally limited due to the current lack of safe and effective pharmacological agents for long-term use. The article summarizes the current experience of using physiotherapy in the treatment of insomnia.

Keywords: review; insomnia; physiotherapy; transcranial electrotherapy; magnetic therapy; phototherapy; hydrotherapy; acupressure; classical massage; aromatherapy

For citation. Kiryukhin, O. L., Deryagina, L. E., Bulatetsky, S. V., & Glushkova, E. P. (2025). Physiotherapy for insomnias: modern views (review). *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(4), 611-658. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-4-1185

Введение

Немедикаментозным методам лечения расстройств сна в современной медицине уделяется большое внимание. В настоящий момент в библиотеке PubMed по запросу «нелекарственные методы лечения инсомнии» (non-pharmacological treatment of insomnia disorder) открывается 262 источников, включая 47 плацебо контролируемых исследований. Причиной такого научного интереса можно назвать несколько факторов. Во-первых, современная медикаментозная терапия имеет ряд недостатков: большое количество побочных эффектов, формирование зависимости от снотворных лекарственных средств, неблагоприятное влияние на дневную активность пациентов и негативное отношение самих пациентов к приёму «снотворных» [19]. К тому же эффективность лекарственной терапии при хронической инсомнии весьма спорна [53], а доля её среди расстройств сна, безусловно, преобладает [52]. Во-вторых, долгосрочный эффект немедикаментозных методов значительно более выражен и устойчив по сравнению с курсами приёма медикаментов, что также играет большую роль в выборе именно этого направления терапии. В-третьих, приверженность пациентов к немедикаментозным методам, ввиду их доступности и физиологичности, гораздо выше, чем к приёму лекарственных препаратов. В угоду этому на рынке представлено много трекеров сна – начиная от программируемых подушек, одеял и кроватей, заканчивая аппаратурой более интенсивного воздействия на организм [71]. Такое массовое использование физических факторов невозможно без научно обоснованного подхода, так как каждый из факторов имеет свои особенности, показания и противопоказания. При этом, современная физиотерапия располагает огромным арсеналом методик, применение которых может влиять на инициацию, продолжительность и качество сна, однако их использование часто вызывает больше вопросов, чем решений [91].

Целью данного обзора литературы была систематизация применяемых методов лечения инсомний.

Анализ результатов исследования

Согласно последним клиническим рекомендациям и зарубежным гайдлайнам, из немедикаментозных методов лечения инсомний [35; 75] рекомендованы к применению психогигиенические мероприятия (организация режима дня, исключение дневного сна, прекращение потребления кофе, крепкого чая, алкоголя, сокращение времени пребывания в постели), когнитивно-поведенческая терапия (КПТ), направленная на улучшение психического здоровья, изменение когнитивных искажений и поведения, физические упражнения [14; 90] и физиотерапия, предполагающая использование с седативной целью физических факторов и методов физического воздействия [12].

Согласно определению Международной классификации расстройств сна третьего пересмотра (МКРС-3), инсомния представляет собой клинический синдром, характеризующийся наличием повторяющихся нарушений инициации, продолжительности, консолидации или качества сна, возникающих, несмотря на наличие достаточного количества времени и условий для сна, и проявляющихся нарушениями дневной деятельности различного вида [22]. Распространённость инсомнии в популяции по разным данным достигает 9-15%, при этом при ряде заболеваний её встречаемость возрастает, а при некоторых расстройствах центральной нервной системы (депрессии, тревожные расстройства, зависимости) приближается к 100% [11]. Для постановки диагноза инсомнии можно выделить три основных признака. Первый – наличие одного или нескольких нарушений сна: пресомнических, интрасомнических, постсомнических. Пресомнические расстройства включают нарушение засыпания, формирование патологических ритуалов отхода ко сну, «боязнь постели», «страх не заснуть» и т.д. В норме время засыпания у детей и подростков не превышает 20 мин, у взрослых – 30 мин. У больных инсомнией оно может увеличиваться до 2 ч и более, при этом часто регистрируются многочисленные короткие эпизоды 1-й и 2-й стадий сна с последующими пробуждениями. Нарушением инициации сна в современной сомнологии считают продолжительность засыпания более 30 минут. Интрасомнические расстройства – частые ночные пробуждения, после которых больному трудно заснуть, что приводит к увеличению времени бодрствования внутри сна, увеличению представленности поверхностных стадий сна и редукции глубоких (дельта сна).

Показателем наличия интрасомнического расстройства может служить время бодрствования внутри сна, превышающее 30 мин. Постсомнические расстройства – ранние утренние пробуждения, приводящие к сокращению времени сна – менее 6,5 ч. Больные инсомнией могут предъявлять жалобы как на одно из перечисленных расстройств, так и на несколько, причем преобладающий симптом может со временем меняться. Необходимо учитывать, что для пациентов с инсомнией, в отличие от здоровых людей, характерно субъективно переоценивать длительность засыпания и количество пробуждений и недооценивать продолжительность своего сна по отношению к объективным показателям полисомнографии. Это несоответствие может быть связано с физиологическим гипервозбуждением и быть одним из основных признаков инсомнии. Второй необходимый признак для постановки диагноза инсомнии - достаточное время и соответствующие условия для полноценного сна. Надо учитывать, что некоторые люди сознательно ограничивают себя во сне или же в силу различных обстоятельств не имеют возможности спать в комфортных условиях нужное время. Третий признак – нарушения ночного сна должны отражаться на качестве последующего бодрствования человека: эмоциональном состоянии, физической активности, когнитивных функциях. Жалобы на «дневной дискомфорт» после бессонной ночи – необходимое условие для признания неудовлетворённости ночным сном инсомнией.

Исходя из этого, выделяют ряд направлений физиолечения, которые воздействуют на разные уровни инсомнии – пресомнические, интрасомнические и постсомнические, т.е. оказывают прямое воздействие на физиологию процессов сна. Влияние же других физических факторов на процессы засыпания опосредовано через воздействие на другие функции центральной нервной системы или психические синдромы, среди которых можно выделить следующие.

1. Влияние на тревогу и повышенную нервную возбудимость.

Излишне тревожные пациенты могут проявлять расстройства сна по причине:

- беспокойства о дневных событиях и предсомнических руминаций (рассуждений о предстоящих делах, «страх будущего» и составление планов выхода из «трудных ситуаций»);

- ночных кошмаров, связанных с перегрузкой головного мозга информацией и впечатлениями дня;

- чуткого и прерывистого ночного сна, вследствие общей эмоциональной возбудимости;

- нарушения засыпания в связи с «катастрофизацией бессонницы».

Поэтому физиотерапевтические техники, направленные на релаксацию и снятие тревожности непосредственно перед сном, или воздействие на «неврастенический радикал» при помощи курсов, например, водолечения, способны решить проблемы засыпания для пациентов данной категории.

2. Влияние на депрессию и состояния меланхолии, приводящие к дефициту сна.

Согласно последним представлениям о природе аффективных расстройств, в основе патогенеза депрессии лежит нарушение обмена нейромедиаторов, особенно серотонина и мелатонина.

Ряд методов физиотерапии, обладающих стимулирующим эффектом (контрастные водные процедуры, ароматерапия, лазеротерапия, светотерапия и т.д.) стимулируют выработку нейропептидов, чем уменьшают аффективный дефицит, косвенно влияя и на процессы засыпания.

3. Воздействие на астенический синдром, сопровождающий часто соматические заболевания, психоэмоциональные перегрузки и физическое перенапряжение.

Одним из проявлений астении, вследствие различных причин, является вегетативная дисфункция ЦНС с преобладанием симпатикотонии. Поэтому физиотерапевтические методы, способствующие активации парасимпатической нервной системы, например, солевые ванны, ароматерапия на основе масел лаванды и розмарина, приводят к установлению баланса в вегетативной регуляции и восстановлению физиологически нормального сна [86].

4. Купирование или облегчение болевого синдрома.

Болевые синдромы – частая проблема, провоцирующая инсомнии у больных с заболеваниями опорно-двигательного аппарата, онкологией и различными посттравматическими синдромами. Физиотерапия болевого синдрома (электротерапия, ультразвуковая терапия, лазеролечение, магнитотерапия и т.д.) становится фактором восстановления ночного сна у таких больных [47].

Таким образом, пути физиотерапевтического воздействия на сон многообразны. И последовательное рассмотрение методов этой сферы немедикаментозного лечения инсомний в структуре данной статьи представляет определённый интерес.

Транскраниальная электротерапия инсомнии

Одним из наиболее распространённых и исторически древних методов воздействия на центральную нервную систему является транскраниальная электротерапия (ТКЭТ). Она подразумевает ряд методов воздействия на

структуры головного мозга с помощью электрического тока разных модальностей. Среди них такие всем известные методики как электросон, транскраниальная электростимуляция, мезодиэнцефальная модуляция, гальванизация головы, транскраниальная микрополяризация, центральная электроанальгезия [3]. Высокая эффективность электротерапии при расстройствах сна доказана в нескольких когортных исследованиях [25; 26; 46].

Механизмы, лежащие в основе седативного эффекта электротерапии весьма разнообразны [72]. Исследования, в которых были использованы компьютерная томография, ЭЭГ, функциональная ЯМРТ головного мозга [36; 37], показали, что объектом воздействия транскраниальной электротерапии являются подкорковые центры регуляции, расположенные в среднем и продолговатом мозге, такие как – ретикулярная формация, чёрная субстанция, хвостатое ядро, лимбические ядра, таламус и гипоталамус. Часто с перевозбуждением этих структур связывают патогенез расстройств сна [29]. При электровоздействии на эти структуры наблюдалось снижение электрической активности теменной и затылочной зоны коры головного мозга, улучшение гипоталамической регуляции вегетативных процессов, снижения восприятия боли, восстановление нарушенных нейронных связей и нормализации процессов, находящихся под контролем подкорковых структур головного мозга, в том числе и процессов сна [37; 56]. В картине ЭЭГ наблюдалось увеличение альфа-активности, снижение дельта- и бета-активности, что коррелирует со снижением тревожности и уровня стресса [65].

В спинномозговой жидкости вследствие электровоздействия выявлено повышение уровня нейромедиаторов и нейрогормонов – мелатонина, серотонина, норадреналина, γ-аминомасляной кислоты и β-эндорфина наряду со снижением концентрации кортизола, что также связано с уменьшением усталости, стабилизацией настроения и улучшением качества сна [56]. По этим причинам электротерапию рекомендуют использовать при депрессиях и тревожных расстройствах, одним из проявлений которых является инсомния [81].

В европейской литературе рекомендуемые параметры краниальной электростимуляции представляют, как импульсный ток низкого напряжения (20-30 В), с биполярными ассиметричными прямоугольными импульсами и частотой от 0,5 до 100 Гц и вариацией силы тока от 10 до 600 мА [37]. При транскраниальной электротерапии в России эти параметры соответствуют физиопроцедуре, называемой *электросон* [90], основой которого являются импульсные токи низкой частоты (1-160 Гц), малой

силы (10 mA), низкого напряжения (20-30 В), с короткой длительностью прямоугольных импульсов (0,2-0,5 мс). Основной наблюдаемый эффект электросонотерапии – седативный, близкий к нормальному физиологическому сну, однако успокоительное лечебное действие проявляется даже при отсутствии сна во время процедуры.

Лечебное действие электросонотерапии реализуется в двух фазах. Первая фаза – «тормозная». Она наступает с момента ощущения пациентом воздействия электрического тока (лёгкая вибрация под электродами, покалывание, ползание мурашек, ощущение пошатывания, сонливость) и длится весь период работы аппарата. При совпадении частот и возникновении резонанса с биологическими ритмами возникает максимальная сонливость и физиологический сон примерно через 5-10 минут от начала процедуры. При этом стимулированный сон имеет ряд особенностей:

- углубление α-ритма и появление θ-волн на ЭЭГ, проводимой одновременно с электросонотерапией;
- урежение сердечного ритма;
- активация дыхания с увеличением содержания кислорода в крови;
- уменьшение и нормализация сахара крови и 17-ОКС.

Вторая фаза – «растормаживания» или активации. При этом наступает пробуждение, сопровождающееся чувством бодрости, свежести. Наблюдается рост работоспособности, интеллектуальной и физической активности. Пациент чувствует себя отдохнувшим даже в большей мере, чем при естественном сне, сохраняя это состояние на протяжении нескольких часов. Это определяет устранение «дневного дискомфорта», характерного для синдрома инсомнии [18].

Для проведения процедуры используют специальную маску для лица с двумя парами металлических электродов, под которые предусмотрены тканевые прокладки, смоченные тёплой водой. Лечебный эффект достигается двумя основными методиками расположения электродов. Первая – глазнично-сосцевидная, когда раздвоенный катод (-) (с гидрофильными прокладками круглой формы диаметром 3-5 см) располагают на глаза при сомкнутых веках, а раздвоенный анод (+) с аналогичными гидрофильными прокладками помещают на сосцевидные отростки. Такая методика более предпочтительна, т.к. электрическому току для попадания в мозг не требуется преодолевать кости черепа, обладающие значительным электрическим сопротивлением. Но в ситуациях, когда нет возможности расположить электроды на глаза (например, при негативном отношении пациента, воспалительных заболеваниях глаз, повышенной чувствитель-

ности кожи век к электротоку) применяют вторую методику - лобно-сосцевидного воздействия. При этом катод (-) располагается над бровями на области лба, анод (+) – над сосцевидными отростками. Такая методика использования электросонотерапии считается менее эффективной, но позволяет избежать негативных реакций, которые могут мешать седации.

Другим хорошо известным методом электролечения инсомний с хорошей доказательной базой является *вестибулярная стимуляция* (электростимуляция вестибулярного нерва). История этого метода началась с крупномасштабного перекрестного исследования (20950 пациентов), изучавшего больных с вестибулярным головокружением, где было показано, что вестибулярная функция тесно связана с продолжительностью сна [21]. По данным полисомнографии у 15,5% больных был нарушен быстрый сон (REM-фаза), у 14,8% – медленный сон. Лица с вестибулярным головокружением достоверно имели более высокий относительный риск нарушения общей продолжительности сна. У исследователей возникло предположение, что если недостаточность вестибулярного нерва вызывает расстройства сна, то его стимуляция могла бы вызвать обратный эффект. Создание и испытание аппарата электростимуляции вестибулярного нерва действительно подтвердило это предположение [41].

Аппараты для этого вида физиолечения представляют собой неинвазивные устройства для трансдермальной нейростимуляции с гарнитурой на батарейках, предназначенное для чрескожной подачи электрического тока низкого уровня (максимум 1 мА при 100 Гц) на проекцию вестибулярного нерва – область сосцевидных отростков с двух сторон. Большинство аппаратов управляются смартфонами через Bluetooth, благодаря чему пациент сам может регулировать уровень силы тока, чтобы избежать неприятных ощущений. Испытуемый определяет уровень нейростимуляции, как только он начнет ощущать легкое покачивание, указывающее на модуляцию вестибулярного нерва. Устройства автоматически выключаются через 30 минут нейромодуляции, т.к. в большинстве случаев пациенты засыпают во время проведения терапии [32]. При обсуждении механизмов действия процедуры, большинство исследователей сравнивают вестибулярную стимуляцию с укачиванием младенцев перед засыпанием. Имеются данные, что одним из эффектов воздействия на вестибулярный нерв является сильная активации парасимпатической нервной системы, которая и способствует улучшению качества и продолжительности сна [42].

Основными недостатками транскраниальных методов электротерапии является её не всегда хорошая переносимость, неудобство от крепления

электродов на области лица и головы, необходимость «подгонки» параметров электрического тока под каждого пациента, и необходимость учёта ряда противопоказаний. Поэтому на смену электротерапии всё больше приходят более современные, неконтактные методы физиотерапии. Одним из которых является транскраниальная магнитотерапия.

Транскраниальная магнитотерапия нарушений сна

На сегодняшний день интерес к транскраниальной магнитотерапии неуклонно растёт. В зарубежной литературе её чаще называют транскраниальной магнитной стимуляцией. Число публикаций, посвященных курсовой транскраниальной магнитной стимуляции, согласно базе данных PubMed, возросло с 67 в 1990 году до 24046 в 2024 г. Как показало сравнение 17 многоцентровых исследований, с вовлечением 967 участников, метод транскраниальной магнитной стимуляции (ТМС) похож по производимым эффектам и механизму действия на транскраниальную электростимуляцию [39]. Но в сравнении с транскраниальной электротерапией, лечение магнитным полем даёт меньше побочных явлений, не вызывает раздражение болевых рецепторов мягких тканей головы, не приводит к нагреву тканей, не вызывает сокращения мелкой мускулатуры головы. Транскраниальная магнитотерапия имеет значительно меньше противопоказаний, поскольку магнитное поле в большинстве случаев не вызывает обострения сопутствующей патологии [80]. А использование девайсов на расстоянии от поверхности тела даёт определённую свободу движениям пациента во сне [62].

Исследования показали, что магнитные поля оказывают разнообразное влияние на работу органов и систем организма. Давно изучаются геомагнитные влияния на работу нервной системы, эндокринных органов и сердечно-сосудистой системы. Определяется природа «метеочувствительности», гелеогеомагнитного реагирования, исследуется влияние естественного геомагнитного фона на течение заболеваний [8; 9].

Воздействие искусственно индуцированного магнитного поля на организм человека создало направление физиотерапии, называемое магнитотерапией. Принцип её основан на взаимосвязи между электрическими и магнитными полями и явлении электромагнитной индукции, которое было открыто английским физиком М. Фарадеем в 1831 году. Воздействие на головной мозг магнитным полем вызывает в нём образование электрических токов и зон электрической активности, подобно воздействию транскраниальной электротерапии, что ведёт к изменению физиологического состояния мозга и ряду терапевтических эффектов (рис. 1).

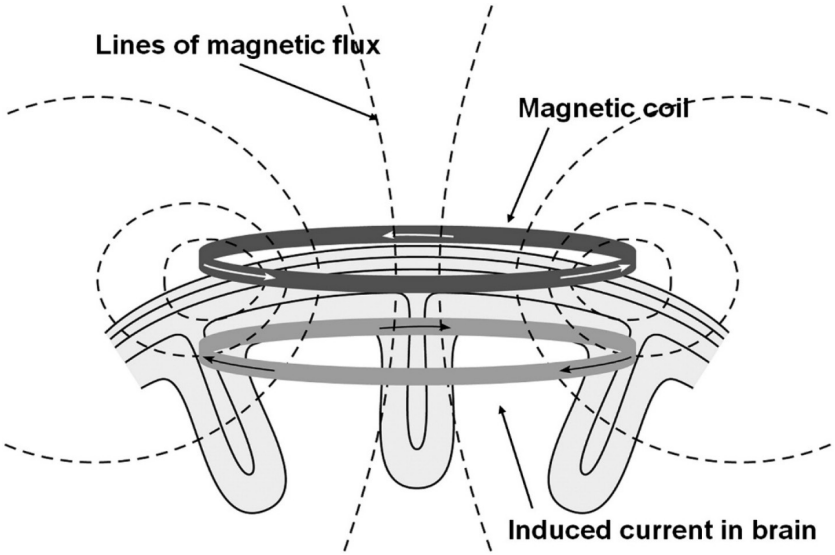


Рис. 1. Механизмы создания индуцированных токов в головном мозге под действием магнитного поля по R. Nardone, 2020 [69].

Метод магнитотерапии активно вошёл в клиническую практику, поскольку является неинвазивным и потенциально обладает широкими диагностическими и терапевтическими возможностями. В транскраниальной магнитотерапии используется седативное влияние на центральную нервную систему импульсного магнитного поля невысокой интенсивности [5; 64; 89]. Причиной наблюдаемых явлений в ряде исследований называют влияние импульсного магнитного поля на процессы обмена γ-аминомасляной кислоты [17]. Также, большую роль отводят влиянию магнитолечения на гипофиз и гипоталамус [50], стимуляция активности которого способствует седации, стабилизации аффекта и улучшению соотношения процессов торможения/возбуждения [61].

С позиций функциональных систем, магнитотерапия, вероятно, обладает способностью воздействовать на процессы регуляции, оказывая влияние на некоторые нейротрансмиттеры. Так, стимуляция лобной доли с частотой 20 Гц приводила к значительному росту уровня дофамина и мелатонина в гиппокампе, стимуляция левой дорсолатеральной префронтальной коры (20 Гц, 20 мин в день) изменяла уровень глютамата в коре не только на стимулируемой, но и на противоположной стороне [1]. Тео-

ретически эти находки объясняют механизм снотворного эффекта транскраниальной магнитотерапии [64].

Именно из-за влияния на обмен нейропептидов, магнитотерапия эффективно используется в лечении двух клинически значимых состояний - инсомний и резистентных к лекарственной терапии депрессий [33]. Доказательная база этих направлений в лечении инсомний насчитывает более 30-ти плацебо-контролируемых исследований с количеством вовлечённых пациентов – 2357 человек [83]. Каждое из этих исследований достоверно подтверждает улучшение качества сна у пациентов испытуемых групп [62].

При транскраниальной магнитной стимуляции магнитное поле генерируется в импульсном режиме интенсивностью 1,5-2 мТл с невысокой частотой, не превышающей – 0,2-1 Гц и длительностью импульса – 100 мс [1]. В ранних исследованиях было показано, что воздействие ТМС частотой ≥ 5 Гц действует возбуждающим образом, а при частотах 0,2–1 Гц – тормозящим образом. Для седативного воздействия на центральную нервную систему используют низкочастотные импульсы (≤ 1 Гц), интенсивностью 1-10 мТл продолжительностью сеанса 10-12 минут [64].

Воздействие на головной мозг низкочастотным низкоинтенсивным магнитным полем и, особенно, бегущим импульсным магнитным полем имеет также и другие положительные эффекты. Существенно снижается возбудимость коры головного мозга, нормализуется биоэлектрическая активность головного мозга, облегчается «напряжение», вызванное стрессом [17]. Магнитные поля повышают активность холинэстеразы, создавая ноотропный эффект, что особенно благоприятно для больных пожилого возраста. Другим важным эффектом магнитного поля является расширение сосудов мышечного типа и улучшение микроциркуляции в головном мозге, что повышает доставку кислорода и также способствует улучшению засыпания [69]. Характеристика электромагнитного поля при ТМС зависит от формы, размера, конструкции электромагнитной катушки и ее ориентации по отношению к голове пациента, от параметров стимуляции [61].

Под действием магнитного поля в головном мозге возникают индуцированные электрические токи, меняющие заряды мембран нейронов. Потенциал действия, возникающий в нейроне под воздействием импульса ТМС, распространяется по аксону и способен через синапсы активизировать множество других окружающих нейронов самых различных модальностей [68]. Поэтому под воздействием ТМС в мозге могут возникать эффекты как кратковременного возбуждения, так и торможения, причем любой стимул, вероятно, может вызывать оба эти эффекта в зави-

симости от своей интенсивности и продолжительности [92]. Дальнейшие эксперименты на животных с исследованием активности метаболизма в задней теменной коре непосредственно после сеанса ТМС подтвердили зависимость уровня процессов торможения и возбуждения в мозге от частоты стимуляции [17; 64]. Однако представление о том, что быстрая ТМС приводит к возбуждающим физиологическим эффектам, а медленная – к тормозящим, является весьма упрощенным и не всегда находит свое подтверждение [17]. На характер нейрофизиологических сдвигов в значительной степени влияет режим стимуляции. Так, стимуляция в прерывистом theta burst режиме (2 секунды стимуляции и 10 секунд пауза) приводила к повышению возбудимости, а постоянная (на протяжении 40 секунд) стимуляция в том же режиме – к торможению [53].

Транскраниальные методы магнитотерапии используются как в период бодрствования пациентов, так и во время наступившего сна. При этом структура сна по данным ЭЭГ сохраняет естественную стадийность и глубину. Так, в ряде исследований [6] доказана эффективность курсового лечения транскраниальной магнитной стимуляцией даже тяжёлых форм инсомнии, резистентных к фармакологическому лечению.

Как правило, аппаратура, способная предоставить такие параметры комплектуется специальными устройствами (шлемы, обручи, повязки с комплексом электромагнитов), индукторы которых создают магнитное поле в области головы пациента. Некоторые системы оснащаются устройствами обратной связи, отслеживающим стадию сна в реальном времени, фиксирующими засыпание для своевременного отключения прибора [2].

Примером использования транскраниальной магнитной стимуляции для лечения инсомнии может служить использование аппарата «АМО-АТОС» с приставкой «Оголовье» [69]. Терминалы «бегущего» магнитного поля располагаются в височно-затылочной области с двух сторон головы. Индукция поля на поверхности терминалов 45 мТл, частота сканирования поля 2-10 Гц. Первые 2 сеанса проводят на частоте 2 Гц (частота нормального ритма сердечно-сосудистой системы), последующие – на частоте 10 Гц (частота нормального альфа-ритма ЭЭГ мозга). Курс ТКМТ состоит из 10 процедур, назначаемых через день, по 15 минут [15].

Другой пример – магнитотерапевтический прибор ДИАМАГ (АЛМАГ-03) компании ЕЛАМЕД. Аппарат создаёт «бегущее» магнитное поле интенсивностью 10 мТл, при котором происходит последовательное возбуждение магнитных индукторов, расположенных вокруг головы пациента. Излучатели размещают к голове таким образом, чтобы индукто-

ры каждой излучающей линейки располагались на затылочной и лобной части головы. Процедуры отпускаются один раз в день. Курс лечения 10-20 дней.

Примером интрасомнического использования магнитотерапии служит применение магнитных полей только в период медленного сна для углубления и нормализации архитектоники сна [16]. Запись и текущий анализ ЭЭГ проводят в течение всего ночного сна. При появлении отчетливых признаков 2-й стадии медленноволнового сна в первом цикле сна проводят импульсную стимуляцию мозга с помощью магнитных источников стимуляции на фиксированной частоте, максимально приближенной к значению характерной для данного пациента дельта частоты, на которой достигается максимум энергетического спектра ЭЭГ пациента в диапазоне 0,5-4 Гц. Если длительность медленноволновой фазы до ближайшего появления признаков наступления REM-фазы сна превышает 10 мин, то стимуляция в первом цикле сна продолжается до начала REM-фазы, в противном случае она продолжается около 10 мин. Указанную стимуляцию осуществляют затем во всех последующих медленноволновых фазах сна в течение всей ночи, причем во втором и последующих циклах сна ее минимальная продолжительность (во время медленноволновых фаз сна) может быть увеличена до 15-20 мин в каждом цикле. Общая длительность первого курса терапии составляет не менее 10 ночей со стимуляцией. Перерывы более чем на 1 ночь недопустимы. Затем принимают решение о продолжении курса, либо о переходе на другой вид стимуляции, то есть если в первом курсе терапии использовали магнитную стимуляцию, то во втором применяют электрическую импульсную стимуляцию и наоборот. Возможно также либо чередование магнитной и электрической стимуляции внутри одного курса [79].

Сотни тысяч пациентов по всему миру подвергаются ежегодно транскраниальной магнитной стимуляции по различным показаниям, важное место среди которых занимает инсомния. Поэтому среди немедикаментозных методов лечения инсомнии ТМС может применяться как самостоятельно, так и в сочетании с другими методами лечения: фармакотерапией, психотерапией, лечебной физкультурой и другими методами физиотерапии [58].

Фототерапия

Одним из лидеров среди физиотерапевтических направлений в лечении инсомний является светолечение или фототерапия и её разновидность – хромотерапия. Это большая группа физиотерапевтических методик, в которых в качестве основного физического фактора выступают электро-

магнитные волны оптического диапазона. Их воздействие на организм человека имеет давнюю историю изучения. Доказательная база светотерапии представлена в крупных плацебо-контролируемых исследованиях и обзорах [54]. Это единственный метод физиотерапии, рекомендованный в Европейском руководстве по лечению инсомнии 2023 года [75].

Физиологическое действие света на организм человека имеет ряд особенностей. При взаимодействии с поверхностью тела большая часть оптического излучения отражается, другая – рассеивается, меньшая часть, зависящая от типа и состояния кожи, поглощается (примерно 45-50%), производя различные фотобиологические реакции, которые и становятся целью применения этой разновидности физиотерапии. Основным объектом восприятия световой энергии в организме является кожа. Поэтому природу и результат получаемого при терапии фотоэффекта определяет не только тип и интенсивность излучения (частота, интенсивность, длинна волны), но и её состояние и способность к восприятию оптической электромагнитной энергии. Для воздействия на состояние нервной системы человека используют различные спектры видимого излучения, длинны волн которых лежат в диапазоне от 400 до 760 нм. Их лечебное применение получило название *хромотерапия*. В 1910 году академик В.М. Бехтерев исследовал различные спектры видимого излучения и установил, что красные оттенки света возбуждают нервную систему, голубой и фиолетовый – успокаивает, зелёный и жёлтый нормализует процессы торможения и возбуждения в нервной системе, обладают антидепрессивным и седативным эффектом. И.Р. Тарханов показал исключительную важную роль белого света, который необходим для нормальной жизнедеятельности человека, проведённые им эксперименты убедительно доказали способность интенсивной инсоляции тела нормализовать биологические циклы, баланс симпатической и парасимпатической системы регуляции [40].

Рядом экспериментов установлено, что яркий белый свет, опосредовано вызывает изменение выработки нейроаминов – повышает содержание в головном мозге мелатонина и серотонина, активизирует работу эпифиза, что влияет на аффективный статус, улучшает засыпание и нормализует соотношение фаз сна [97]. Сообщения о нарушении циркадных ритмов в определённых клинических ситуациях, например, в период климактерических изменений, в постстрессовых состояниях и аффективных расстройствах, при старении организма [38], заставили искать способы нормализации этих ритмов. Одним из таких направлений послужило светолечение. Показано, что хромотерапия в большинстве случаев даже превосходит по

эффективности лекарственную терапию. Правильно подобранное освещение поверхности тела по данным исследователей увеличивает амплитуду и продолжительность циркадных ритмов, нормализуя продолжительность и глубину сна [20], без существенных побочных эффектов.

Метод основан на влиянии солнечного, либо яркого белого света от искусственных источников с определенными длинами волн – от 470 до 525 нм (зелёный и жёлтый спектр). Согласно данным многочисленных рекомендаций [54], интенсивность света для освещения поверхности тела при лечении инсомнии должна составлять от 4000 до 10000 лк. Рекомендуемая продолжительность сеанса светолечения зависит от переносимости процедуры – от 20 минут с нарастанием времени экспозиции, по мере привыкания пациента - до 45 минут. Сеансы светолечения проводят сразу же после пробуждения человека, однако некоторые сомнологи рекомендуют использовать нарастающую интенсивность освещения еще до окончания сна. Такая утренняя стимуляция, по мнению специалистов, позволяет управлять циркадными ритмами, активирует гормональный фон и нейротрансмиттерный обмен, что в итоге опосредованно влияет и на процесс засыпания.

На сегодняшний день существуют два типа фототерапевтических устройств. Устройства одного типа имеют большие размеры и устанавливаются на полу или столе – в форме стационарных ламп или настольных лайтбоксов. Источником света в них служат люминесцентные лампы или крупногабаритные матрицы светоизлучающих диодов, производящие некогерентный поляризованный свет. Одним из таких устройств является светотерапевтический аппарат «Биоптрон». Спектр длины световой волны в нём составляет от 480 до 3400 нм. В этом спектре нет ультрафиолетовой составляющей и содержится небольшая доля инфракрасного света. Хотя данные устройства можно перемещать из одного положения в другое, они – не портативны и требуют от пациента находиться вблизи их в течение 20-40 мин, в зависимости от мощности установленного освещения. Несмотря на эти неудобства, такие устройства очень популярны среди европейцев, а приобретение лайтбоксов мощностью света 10000 лк оплачивается по системе медицинского страхования.

Фототерапевтическое устройство второго типа имеет другой принцип действия. В этих устройствах используются источники сфокусированного или нерассеянного света для направления его в зону глаз пациента. Данные устройства выполнены в форме очков или козырьков, закрепляющихся на голове. Они портативны, вполне могут переноситься в ручной клади и применяться в любом месте пребывания их обладателя.

Светотерапия этими устройствами проводится в период бодрствования пациента, обычно в утренние часы. Такая утренняя стимуляция, по мнению специалистов, нормализует циркадный ритм и уровень нейрогормонов, что в итоге опосредованно влияет и на процессы засыпания. Другие исследователи практикуют вечернюю фототерапию, которая проводится за 30 мин до сна [97]. По этой методике освечивают зону шейно-воротниковой области и точки, расположенные вдоль позвоночника до копчика по 2-4 минуты. Курс лечения продолжался до улучшения состояния сна и состоит как правило из 10-12 процедур. На это принципе основано влияние портативных «воротников», облучающих шейно-воротниковую зону инфракрасным спектром света за час до предполагаемого сна [54].

Часто светолечение дополняют хромотерапией (цветолечением) – использованием излучения разного цвета, которое позволяет усилить лечебный эффект в зависимости от светового диапазона:

- красный цвет возбуждает нервную систему, поэтому хромотерапию с ним лучше использовать с утра или, когда нужно взбодриться;

- зеленый цвет действует противоположно красному, то есть успокаивает и гармонизирует, что делает его полезным при сильном стрессе, постоянных физических и умственных нагрузках;

- синий оттенок действует почти так же, как зеленый, поэтому тоже подходит для снятия напряжения (рекомендован для расслабления в вечернее время и перед сном;

- желтый благоприятно воздействует на когнитивные способности: улучшает память и концентрацию, а еще оказывает благоприятное действие при проблемах с кожей и желудком;

- фиолетовый помогает стабилизировать артериальное давление и нормализовать психическое состояние при переутомлении;

- оранжевый, как и красный, бодрит, но одновременно помогает снять мышечные спазмы.

Также хромотерапию часто сочетают с водолечением, массажем и другими седативными процедурами для усиления общего эффекта.

Таким образом, светолечение улучшает качество сна, не создавая неудобств в период ночи, и не принося больным неприятных ощущений.

Водолечение инсомнии

Одна из древнейших методик физиолечения, применявшееся со времён Гиппократа, насчитывает сотни разновидностей – начиная от античных ароматических ванн и заканчивая современными достижениями СПА-терапии, являющимися гордостью известных санаториев и крупных реаби-

литационных центров. На сегодняшний день водолечение принято делить на две большие группы: методы использования пресной воды – гидротерапия и применение минеральной воды – бальнеотерапия. И то и другое направление широко представлены в физиотерапевтических отделениях ввиду своей хорошей переносимости, эффективности и уважения среди больных. По последним данным водолечение является вторым по частоте использования методов физиотерапии в санаторно-курортном деле и реабилитационных отделениях [30].

Из физических факторов, действующих на организм при водолечении, называют термический, механический и химический. Ответная реакция организма на действие водных процедур формируется благодаря как непосредственному действию термического, химического и механического факторов на кожу, так и образованию биологически активных веществ при раздражении рецепторов, включающие обменные процессы. Именно термическому эффекту придают решающее значение при объяснении положительного влияния водолечения на расстройства сна [76]. При термическом воздействии воды в организме меняется терморегуляция, включаются процессы теплоотдачи и теплообразования. Наблюдаются сосудистые реакции и рефлекторные сокращения поверхностных мышц [67]. Ряд исследований показали, что на всех стадиях физиологически нормального сна происходит постоянная смена температуры за счёт изменения кожного кровотока, уровня гормонов и регуляции потоотделения [27]. Основная температура тела начинает снижаться при подготовке ко сну, что способствует появлению сонливости и выработке мелатонина, который сигнализирует организму о готовности ко сну [57]. Снижение «внутренней» температуры тела достигается за счёт увеличения кожного кровотока и периферической теплопотери, что приводит даже к некоторому повышению температуры на поверхности кожи [76]. Поэтому некоторое понижение «внутренней» температуры тела способствует засыпанию и активирует работу парасимпатической нервной системы, которую раньше называли «царицей сна». Таким образом, компенсаторное снижение температуры тела после приёма, например, горячей ванны доказано улучшает засыпание и нормализует нарушенный циркадный ритм сна-бодрствования [24; 67]. Терморегуляция активна и на всех стадиях сна, снижается в фазу быстрого сна, несколько повышается в медленный сон, повышается при пробуждении [23]. Поэтому влияние водолечения на сон часто зависит от времени суток, в которое проводят гидротерапию.

Механический фактор действует на организм через механорецепторы кожи, вызывая те или иные ответные реакции организма. При проведении

водных процедур, сопровождающихся движением воды, пузырьков газа, давлением струи или объёма воды, механическое воздействие выходит на первое место, вызывая релаксацию и расслабление скелетной мускулатуры, что способствует засыпанию.

Химический (биологический) фактор проявляется при назначении минеральных или лекарственных ванн, когда на организм действуют дополнительно газы, микроэлементы, лекарственные вещества. Химический фактор зависит от содержания минеральных и органических веществ в водной среде. Известно, что седативным действием обладают: концентраты для ванн с растительными экстрактами «Розмарин» и «Валериана», «Валериана с бромом», «Лаванда», «Розмарин», «Мелисса». Применение их в месте с солевыми ваннами улучшают эффект за счёт эмульгирующего действия соли.

Расслабляющая атмосфера и действие термальной воды с ее механическими и химическими эффектами обезболивания, релаксации, седативным и отвлекающим действием способствуют облегчению засыпания в течение двух часов после принятия ванны [93]. Ряд исследований отметили влияние ванн на секрецию кортизола, гормона стресса и контринсулярного действия, что также может послужить одним из механизмов влияния на сон [84].

Много сообщений в иностранной литературе посвящено лечению инсомнии применением местных (ножных и ручных) ванн [20; 59; 84]. Ванны для ног проводятся непосредственно перед сном за час до предполагаемого отхода ко сну. Для процедуры используется пресная вода, температурой 38-42°С, глубина погружения не менее 15 см. Время проведения – 15-20 минут с последующим растиранием сухим полотенцем и укладыванием пациента в кровать с укрыванием тёплым одеялом и созданием необходимых условий для засыпания, исключением активных видов деятельности [65]. Технология составления ручных ванн отличается только глубиной наполнения ванны (10 см) и длительностью – 10-15 мин. Ванны для рук и для ног по данным исследователей обладают равно эффективным действием на процесс засыпания как по данным анкетирования, так и по результатам полисомнографии [60]. Авторы допускают использование ароматерапии и фитопрепаратов при проведении местных ванн [59; 94].

Эффективность бальнеотерапии в лечении инсомний обосновано во многих исследованиях, посвящённых лечению расстройств сна [30; 93]. Предлагается большое количество методик составления ванн и солевых коктейлей, к сожалению, не имеющих достаточной доказательной базы.

Одной из наиболее известных в России методик бальнеотерапии для лечения инсомний является азотно-кремнистая ванна с малым содержа-

нием радона. Научные исследования эффективности азотно-кремнистой с малым содержанием радона воды на курорте Белокуриха, подтвердили ее саногенетический и адаптационно-приспособительный потенциал при стресс-индуцированных, тревожных и психовегетативных синдромах [7]. Положительное действие азотно-кремнистых термальных с малым содержанием радона ванн на процессы засыпания доказано значительным количеством клинических исследований [13]. Показано как улучшение инициации сна, так и улучшение его качества и увеличение его продолжительности.

Ванны проводятся следующим образом. В объём воды температурой 36-37ºС добавляют растворённый предварительно в малом количестве воды азотнокислую соль кремния и с концентрацией радона 5,5-6,0 нКю/дм^3. Первая процедура выполняется в течение 5 минут, вторая – 8 минут, третья – 10 минут, остальные – по 15 минут. Погружение больного в ванну осуществляется только до уровня сосков, обсушивание после процедуры кожи проводится без растирающих приемов для пролонгирования действия продуктов распада радона. Пациенту назначают курс из десяти ванн ежедневно.

Статистически значимая положительная динамика показателей полисомнографии у пациентов с инсомнией объясняется действием азотно-кремнистых слаборадоновых вод на циркадные ритмы нервной деятельности, активацией нейрогенных обменных и нейрогормональных механизмов, что положительно сказывается не только на психофизиологическом статусе пациентов с хронической инсомнией, но и на качестве сна – его внутренних параметрах [7].

Массаж

Изучение эффективности массажа при расстройствах сна началось со времён прошлого века [88]. Существует масса когортных исследований о применении различных видов массажа при инсомниях у лиц разных категорий [44; 77; 82]. В одних исследованиях доказана эффективность общего массажа всего тела по расслабляющей технологии с целью релаксации перед сном [70, 99], в других – обоснована эффективность массажа спины по релаксационной методике с разминанием продольных мышц спины [78], ряд исследований доказали эффективность массажа лица с использованием точек акупунктуры [73; 98], и массажа шейно-воротниковой зоны [74], глубокий соединительно-тканный массаж по-прежнему применяется в немецких клиниках для лечения бессонницы [88]. Активно исследуются аппаратные методы массажа при инсомнии [34]. Обилие

современной массажной аппаратуры можно наблюдать в прайс-листах известных производителей [4].

При преходящей и кратковременной бессоннице непродолжительный сеанс массажа поможет расслабиться и быстро уснуть [78]. Это касается острых форм инсомнии, в основе которых чаще лежит острая реакция на стресс. Это состояние требует проведения процедур для релаксации, успокоения, при этом не нарушая ясности мышления, чтобы не затормозить процесс когнитивной переработки стрессовой ситуации. Сложнее строится работа с хронической бессонницей.

Из предлагаемых видов массажа с доказанной эффективностью на первом месте определяют точечные виды массажа, сходство которых с акупунктурой и рефлексотерапией определяет их особое положение среди физических факторов [74].

Особенности точечного массажа

Народные китайские целители полагают, что нарушения сна происходят из-за неравномерного распределения энергии. В то время как некоторые меридианы перегружены энергией, другие полностью заблокированы и по ним энергия вообще не проходит. Точечный массаж направлен на то, чтобы разблокировать эти меридианы и сделать энергию организма гармоничной [99]. Точечный массаж выполняется путём надавливания на биологически активные точки, соединяющие меридианы и передающие биоэлектрические импульсы организму. Во время нажатия на акупунктурные точки высвобождаются естественные болеутоляющие эндорфины, ускоряется циркуляция крови, происходит насыщение тканей кислородом, активизируются обменные процессы, расслабляются напряжённые мышцы, организм очищается от токсинов. Благодаря этому улучшается общее самочувствие, уходит бессонница.

Технику точечного массажа очень легко освоить. Он выполняется подушечкой большого, указательного или среднего пальцев. Понемногу увеличивая давление, надо массировать определённую точку до появления лёгкого болезненного чувства – это делается небольшими по амплитуде колебательно-вращательными движениями, словно палец «ввинчивается» в ткань. Надавливание должно происходить на протяжении 5-7 секунд, а потом медленно прекращаться. Спустя 3-4 секунды приём желательно повторить. Массирование каждой точки должно занимать не дольше 2-3 минут.

Такой массаж от бессонницы делают вечером, за 5-15 минут перед сном. Технически – сначала нужно растереть ладони, чтобы они разогрелись. Потом 10-20 раз погладить лицо руками, как при умывании. Затем

необходимо помассировать точку инь-тан, которая располагается между бровями, и надбровные дуги до самых висков. Массаж выполнять сидя, со склонённой вперёд головой, или лёжа на спине. Далее массируют ушные раковины движениями сверху вниз. Пальцы при этом располагаются так: большой – за ухом, указательный – спереди. Массируются мочки ушей, пока уши не «начнут гореть».

Многие китайские исследователи рекомендуют использовать в лечении инсомний точечный массаж ног. При этом ноги следует опустить в тёплую воду до лодыжек, подождать пока они нагреются, и массировать точку юн-цюань, находящуюся на середине подошвы. Это способствует нормализации работы печени, улучшает самочувствие и укрепляет сон. Выше коленного сустава, ближе к внутренней стороне подколенной складки, находится точка цюй-цюань. Приняв лежачее или сидячее положение, необходимо массировать поочередно обе ноги.

В европейских и российских руководствах по массажу для лечения инсомний рекомендуется классический массаж головы. Для доказательства эффективности этого вида лечения проведены когортные исследования с рандомизацией и плацебо-контролем [43].

Классический массаж головы

Массаж головы – один из самых успешных методов лечения инсомнии при соблюдении технической последовательности процедуры [43]. Краткую выдержку из последовательности действий при классическом массаже головы приводим с целью формирования о нём общих представлений.

1. Помогите клиенту принять удобное положение.

2. Начните процедуру с движения прямой ладонью правой руки в направлении от правого уха к левому. На середине перехватите движение левой рукой и продолжите его до левого уха.

3. Массирующими движениями кончиками пальцев проработайте зону лба, висков.

4. Зигзагообразными движениями проработайте всю поверхность головы.

5. Надбровные дуги, углубления на внешнем конце бровей, за ушами, сосцевидные отростки, затылочный бугор – проработайте все эти точки, симметрично надавливая на них кончиками пальцев в течение 5-10 секунд.

6. Прямыми ладонями пройдите от лба к затылку (при выполнении подобных движений будьте аккуратны, не зацепите волосы и не доставьте клиенту дискомфорт).

7. Аккуратно потяните волосы, отступая на 1 сантиметр от корня. Проработайте так поверхность всей головы.

После проведения процедуры пациент должен находиться в покое в хорошо проветриваемом помещении. И в течении ближайших двух часов может ложиться спать [10].

Нельзя не коснуться темы массажных кресел, так популярных в последнее время среди производителей аппаратуры для массажа. [34]. Основной эффект механического релаксирующего воздействия в современных массажных креслах дополняется системой покачивания, что посредством воздействия на вестибулярный аппарат вызывает сильную седацию и сонливость [48]. В исследованиях установлено, что курс лечения на массажных креслах достоверно снижает уровень кортизола, повышает уровень серотонина и мелатонина, посредством воздействия на механорецепторы кожи вызывает отвлекающий и разогревающий эффект [28]. Музыка для релаксации, часто дополняющая работу кресла, меняет ритм электрической активности головного мозга в стороны α-ритма, что приближает его состояние к ритмам сна [49]. Всё это способствует улучшению качества сна, ускоряет засыпание и продлевает со в среднем на 2-2,5 часа [34].

Ароматерапия

Одним из направлений физиолечения, которое успешно удаётся сочетать с массажем, седативной гидротерапией, физическими упражнениями и магнитолечением является ароматерапия. Растёт количество исследований, доказывающих её эффективность в лечении инсомний, особенно во время проведения ручного массажа, приёма тёплых ванн, различных методов релаксации и приготовлений ко сну [87].

Системный комплексный анализ рандомизированных плацебо-контролируемых исследований, изучающих применение ароматерапии при лечении инсомний убедительно доказывает её эффективность при нарушения сна различной природы и при многих заболеваниях [45; 52].

Ароматерапия имеет долгую многовековую историю. Зародившись в Китае, с древних времен она использовалась для укрепления организма и лечения болезней. Древние трактаты об использовании в лечении болезней многообразия ароматов трав и эфиров датированы 2-3 веком до нашей эры. Метод находит и широкое применение в наши дни [95]. Эффект ароматерапии достигается путем вдыхания ароматических веществ, массажа с ароматическими маслами, принятия ванн и других способов нанесения ароматических экстрактов на организм человека. Молекулы, составляющие аромат, воздействуют в большей степени на рецепторы дыхательных путей, в меньшей степени – на кожу и слизистые, вызывая реакцию лимбической системы головного мозга регулируя и трансформируя сигналы,

проходящие через гипоталамус, снижая болевые ощущения, уменьшая работу симпатической нервной системы и повышая активность парасимпатической, что способствует снятию стрессового напряжения, вызывает релаксацию мышц, улучшает засыпание и качество сна [66]. В лечении инсомнии исследования подтвердили эффективность ароматических масел лаванды, розмарина, розы дамасской, майорана и полевого мака. Использование последнего, к сожалению, ограничено из-за содержания в нём опиоидных компонентов. Что касается лаванды, розмарина и майорана, проведены сотни когортных исследований по эффективности использования их эфирных масел в лечении инсомнии у студентов [66], взрослых [51], пациентов пожилого возраста [45], больных сахарным диабетом [96], онкологией [85]. Проведены исследования об использовании ароматерапии в лечении постстрессовых расстройств, депрессии и тревоги. Кроме того, в ряде исследований было показано, что как методы ингаляции, так и массажа эффективны для улучшения сна, независимо от типа используемого масла (однокомпонентного или смешанного), однако метод массажа с ароматическими маслами более эффективен, чем метод ингаляций. Сообщалось о статистически значимых различиях в эффективности методов ингаляции, приема внутрь и массажа при ароматерапии, что указывает на то, что эффект ароматерапии варьируется в зависимости от метода применения [31].

Механизм действия лавандовых экстрактов объясняется влиянием на обмен нейропептидов, особенно на выработку мелатонина, экспоненциальный рост которого при вдыхании аромата лаванды быстро вызывает засыпание и повышает качество сна [96]. Эффект гидрозоля розмарина был опосредован стимуляцией серотонинэргических рецепторов, имеет количественно-зависимый эффект [63]. Улучшение эмоционального фона и стабилизация аффекта под воздействием экстрактов розмарина доказано способствует и улучшению качества сна [87].

Заключение

Количество методов физиотерапии расстройств сна продолжает неуклонно расти. Вместе с ростом потребности в немедикаментозном лечении инсомний расширяются и совершенствуются как имеющиеся методики, так и появляются новые разработки. Также активно развивается промышленность, выпускающая аппаратуру для проведения магнито-, свето-, электролечения, появляются в продаже ванны с гидромассажем по седативным методикам, с хромотерапией и возможностью проведения ароматерапии.

Поэтому, безусловно, физиотерапия седативного направления имеет большое будущее.

В данной статье мы не коснулись таких методов лечения бессонницы, как иглорефлексотерапия, акупунктура, кинезиологические техники, фитотерапия, музыкотерапия и многие другие авторские методики. Багаж этих направлений достаточно велик и выходит за рамки обзорной статьи. Кроме того, нами не было найдено достаточно доказательной базы для подтверждения эффективности многих предлагаемых процедур. Однако положительных отзывов и рекомендаций по этим методам достаточно много, поэтому оставляем этот вопрос для самостоятельного изучения заинтересованным читателям.

Список литературы

1. Белова, А. Н., & Балдова, С. Н. (2015). Транскраниальная магнитная стимуляция: клиническое применение и научные перспективы. *Успехи современного естествознания*, (9-1), 34–42. EDN: https://elibrary.ru/UNXDDR
2. Блынский, Ф. Ю., & Шкуратов, А. В. (2015). Автономная система для низкочастотной импульсной магнитотерапии. *Векторы благополучия: экономика и социум*, (Спецвыпуск). EDN: https://elibrary.ru/UBTJWN
3. Бяловский, Ю., Булатецкий, С., Иванов, А., Дерягина, Л., Глушкова, Е., & Ракитина, И. (2019). Транскраниальная электростимуляция как эффективный физиотерапевтический метод. *Врач*, *30*(1), 17–26. DOI: https://doi.org/10.29296/25877305-2019-01-03. EDN: https://elibrary.ru/YVJCWD
4. Выдренкова, Т. М. (2024). Массаж как бизнес: исследование рыночных тенденций и потребительских предпочтений. *Вестник науки*, *2*(4), 37–44. DOI: https://doi.org/10.24412/2712-8849-2024-473-37-44. EDN: https://elibrary.ru/BJGNXB
5. Гилинская, Н. Ю. (1998). Магнитотерапия заболеваний нервной системы. *Альманах клинической медицины*, (1). EDN: https://elibrary.ru/HZDFIL
6. Горяев, А. Г., & Кулишова, Т. В. (2021). Оптимизация комплексного санаторно-курортного лечения больных с хронической инсомнией путём включения транскраниальной магнитотерапии. *Вестник восстановительной медицины*, *20*(2), 118–125. DOI: https://doi.org/10.38025/2078-1962-2021-20-2-118-125. EDN: https://elibrary.ru/WHIEGE
7. Горяев, А. Г., & Кулишова, Т. В. (2016). Патогенетическое обоснование санаторно-курортного лечения с включением азотно-кремнистых слаборадоновых ванн и транскраниальной магнитотерапии пациентов. *Кардиоваскулярная терапия и профилактика*, (5), 41.

8. Захаров, Ю. Б., Кругликова, А. А., Биленко, Н. П., & Пыхалова, Н. Е. (2019). Влияние магнитных бурь на организм человека. *Современные проблемы физики, биофизики и инфокоммуникационных технологий*, (8). EDN: https://elibrary.ru/OQRLEV
9. Захаров, Ю. Б., Кругликова, А. А., Пыхалова, Н. Е., Сухих, С. А., Захаров, М. Ю., Ненашев, Д. С., & Шилов, В. П. (2021). Некоторые особенности влияния магнитных бурь на организм человека. *Современные проблемы физики, биофизики и инфокоммуникационных технологий*, (11). EDN: https://elibrary.ru/VFRTWH
10. Ибрагимова, А. Г. (1967). Электросон и электроанестезия. *Казанский медицинский журнал*, *48*(3), 108–110.
11. Остроумова, О. Д., Кочетков, А. И., Эбзеева, Е. Ю., & Переверзев, А. П. (2021). *Инсомния и полиморбидность: учебное пособие*. Москва: ФГБОУ ДПО РМАНПО Минздрава России, 76 с. ISBN: 978-5-7249-3183-0
12. Кулишова, Т. В., Горяев, А. Г., Бабушкин, И. Е., & Табашникова, Н. А. (2023). Непосредственные и отдалённые результаты исследования качества сна и качества жизни у пациентов с хронической инсомнией после включения природных факторов. *Современные проблемы науки и образования*, (5). DOI: https://doi.org/10.17513/spno.32990. EDN: https://elibrary.ru/AXTTWI
13. Кулишова, Т. В., Горяев, А. Г., Бабушкин, И. Е., & Табашникова, Н. А. (2023). Эффективность азотно-кремниевых слаборадоновых ванн в комплексном лечении больных с хронической инсомнией. *Современные проблемы науки и образования*, (6). DOI: https://doi.org/10.17513/spno.33112. EDN: https://elibrary.ru/XJBPXK
14. Курушина, О. В., Барулин, А. Е., & Багирова, Д. Я. (2019). Современные подходы к лечению инсомнии в общетерапевтической практике. *Медицинский совет*, (6), 20–26. DOI: https://doi.org/10.21518/2079-701X-2019-6-20-26. EDN: https://elibrary.ru/ZGZRAD
15. Кулишова, Т. В., & Горяев, А. Г. (2020). *Способ лечения больных с хронической инсомнией* (Патент РФ на изобретение № 2714296; Бюл. № 5 от 13.02.2020).
16. Дунаевский, Л. В., & Индурский, П. А. (2007). *Способ нормализации архитектуры сна больных депрессиями, тревожными расстройствами, обсессивно-компульсивными расстройствами и тяжёлыми инсомниями посредством импульсной магнитной и электростимуляции во время медленноволновых фаз ночного сна человека* (Патент РФ на изобретение № 2304988; Бюл. № 24 от 27.08.2007).

17. Пономаренко, Г. Н., Болотова, Н. В., & Райгородский, Ю. М. (2016). *Транскраниальная магнитотерапия*. Санкт-Петербург: Человек, 156 с.
18. Соболева, Е. М., & Каладзе, Н. Н. (2021). Электросон как метод патогенетической терапии при ювенильном ревматоидном артрите. *Вестник физиотерапии и курортологии*, (2). DOI: https://doi.org/10.37279/2413-0478-2021-27-2-39-42. EDN: https://elibrary.ru/WWSSZS
19. Солтангишиева, А. А., Бат, Н. М., & Никифорова, Е. Б. (2023). Анализ научных рекомендаций по лекарственной терапии инсомний. *Вестник Смоленской государственной медицинской академии*, (3), 92–101. DOI: https://doi.org/10.37903/vsgma.2023.3.13. EDN: https://elibrary.ru/DXWAZJ
20. Aghamohammadi, V., Salmani, R., Ivanbagha, R., Effatidaryani, F., & Nasiri, K. (2020). Footbath as a safe, simple, and non-pharmacological method to improve sleep quality of menopausal women. *Research in Nursing & Health*, *43*, 621–628. DOI: https://doi.org/10.1002/nur.22082. EDN: https://elibrary.ru/YDIZJK
21. Albathi, M., & Agrawal, Y. (2017). Vestibular vertigo is associated with abnormal sleep duration. *Journal of Vestibular Research*, *27*(2–3), 127–135.
22. American Academy of Sleep Medicine. (2014). *International classification of sleep disorders* (3rd ed.: diagnostic and coding manual). Darien, IL: American Academy of Sleep Medicine.
23. Amici, R., Cerri, M., Ocampo-Garcés, A., Baracchi, F., Dentico, D., & Jones, C. A. (2Desktop). Cold exposure and sleep in the rat: REM sleep homeostasis and body size. *Sleep*, *31*, 708–715. DOI: https://doi.org/10.1093/sleep/31.5.708
24. An, J., Lee, I., & Yi, Y. (2019). The thermal effects of water immersion on health outcomes: an integrative review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *16*, 1280. DOI: https://doi.org/10.3390/ijerph16071280
25. Aseem, A., Chaudhry, N., & Hussain, M. E. (2022). Cranial electrostimulation improves slow wave sleep in collegiate population: a polysomnographic study. *Sleep Science*, *15*(1), 88–94. DOI: https://doi.org/10.5935/1984-0063.20220029. EDN: https://elibrary.ru/PZDPQP
26. Aseem, A., & Hussain, M. (2019). Impact of cranial electrostimulation on sleep: a systematic review. *Sleep and Vigilance*, *3*. DOI: https://doi.org/10.1007/s41782-019-00075-3
27. Bach, V., Telliez, F., & Libert, J. P. (2002). The interaction between sleep and thermoregulation in adults and neonates. *Sleep Medicine Reviews*, *6*, 481–492. DOI: https://doi.org/10.1053/smrv.2001.0177
28. Baek, J. Y., Lee, E., Gil, B., Jung, H. W., & Jang, I. Y. (2022). Clinical effects of using a massage chair on stress measures in adults: a pilot randomized con-

trolled trial. *Complementary Therapies in Medicine*, *66*, 102825. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ctim.2022.102825. EDN: https://elibrary.ru/RJFHFN

29. Bonnet, M. H., & Arand, D. L. (2010). Hyperarousal and insomnia: state of the science. *Sleep Medicine Reviews*, *14*(1), 9–15. DOI: https://doi.org/10.1016/j.smrv.2009.05.002
30. Castelli, L., Galasso, L., Mulè, A., Ciorciari, A., Fornasini, F., Montaruli, A., Roveda, E., & Esposito, F. (2022). Sleep and spa therapies: what is the role of balneotherapy associated with exercise? A systematic review. *Frontiers in Physiology*, *13*, 964232. DOI: https://doi.org/10.3389/fphys.2022.964232. EDN: https://elibrary.ru/DQISXP
31. Cheong, M. J., Kim, S., Kim, J. S., Lee, H., Lyu, Y. S., Lee, Y. R., Jeon, B., & Kang, H. W. (2021). A systematic literature review and meta-analysis of the clinical effects of aroma inhalation therapy on sleep problems. *Medicine (Baltimore)*, *100*(9), e24652. DOI: https://doi.org/10.1097/MD.0000000000024652. EDN: https://elibrary.ru/IHTIVI
32. Cheung, T., Lam, J. Y. T., Fong, K. H., Cheng, C. P.-W., Ho, A., Sittlington, J., Xiang, Y.-T., & Li, T. M. H. (2023). Evaluating the efficacy of electrical vestibular stimulation (VeNS) on insomnia adults: study protocol of a double-blinded, randomized, sham-controlled trial. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *20*(4), 3577. DOI: https://doi.org/10.3390/ijerph20043577. EDN: https://elibrary.ru/QJCXQT
33. Chopra, A., Singal, P., & Kodya, S. (2023). Impact of deep transcranial magnetic stimulation on insomnia outcomes in patients with treatment-resistant depression: a retrospective study. *Journal of Clinical Sleep Medicine*. DOI: https://doi.org/10.5664/jcsm.10954. EDN: https://elibrary.ru/GCOIOQ
34. De Souza, T. P. B., Kurebayashi, L. F. S., de Souza-Talarico, J. N., & Turrini, R. N. T. (2021). The effectiveness of chair massage on stress and pain in oncology. *International Journal of Therapeutic Massage & Bodywork*, *14*(3), 27–38. DOI: https://doi.org/10.3822/ijtmb.v14i3.619. EDN: https://elibrary.ru/NFPSOF
35. Drager, L. F., Assis, M., Bacelar, A. F. R., Poyares, D. L. R., Conway, S. G., Pires, G. N., de Azevedo, A. P., Carissimi, A., Eckeli, A. L., Pentagna, Á., Almeida, C. M. O., Franco, C. M. R., Sobreira, E. S. T., Stelzer, F. G., Mendes, G. M., Minhoto, G. R., Linares, I. M. P., Sousa, K. M. M., Gitaí, L. L. G., Sukys-Claudino, L., Sobreira-Neto, M. A., Zanini, M. A., Margis, R., & Martinez, S. C. G. (2023). 2023 guidelines on the diagnosis and treatment of insomnia in adults — Brazilian Sleep Association. *Sleep Science*, *16*(Suppl 2), 507–549. DOI: https://doi.org/10.1055/s-0043-1776281

36. Ferdjallah, M., Bostick, F. X., & Barr, R. E. (1996). Potential and current density distributions of cranial electrotherapy stimulation (CES) in a four-concentric-spheres model. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, *43*(9), 939–943. DOI: https://doi.org/10.1109/10.532128
37. Feusner, J. D., Madsen, S., Moody, T. D., Bohon, C., Hembacher, E., Bookheimer, S. Y., & Bystritsky, A. (2012). Effects of cranial electrotherapy stimulation on resting state brain activity. *Brain and Behavior*, *2*(3), 211–220. DOI: https://doi.org/10.1002/brb3.45
38. Forbes, D., Culum, I., Lischka, A. R., Morgan, D. G., Peacock, S., Forbes, J., & Forbes, S. (2009). Light therapy for managing cognitive, sleep, functional, behavioural, or psychiatric disturbances in dementia. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, (4), CD003946. DOI: https://doi.org/10.1002/14651858.CD003946.pub3
39. Friedman, L., Zeitzer, J. M., Kushida, C., Zhdanova, I., Noda, A., Lee, T., Schneider, B., Guilleminault, C., Sheikh, J., & Yesavage, J. A. (2009). Scheduled bright light for treatment of insomnia in older adults. *Journal of the American Geriatrics Society*, *57*(3), 441–452. DOI: https://doi.org/10.1111/j.1532-5415.2008.02164.x
40. Gooley, J. J. (2008). Treatment of circadian rhythm sleep disorders with light. *Annals of the Academy of Medicine, Singapore*, *37*(8), 669–676. PMID: 18797560
41. Goothy, S. S. K., & McKeown, J. (2020). Modulation of sleep using electrical vestibular nerve stimulation prior to sleep onset: a pilot study. *Journal of Basic and Clinical Physiology and Pharmacology*, *32*(2), 19–23. DOI: https://doi.org/10.1515/jbcpp-2020-0019. EDN: https://elibrary.ru/DCHJKG
42. Goothy, S. S. K., Vijayaraghavan, R., & Chakraborty, H. (2023). A randomized controlled trial to evaluate the efficacy of electrical vestibular nerve stimulation (VeNS), compared to a sham control for the management of sleep in young adults. *Journal of Basic and Clinical Physiology and Pharmacology*, *34*(3), 391–399. DOI: https://doi.org/10.1515/jbcpp-2023-0036. EDN: https://elibrary.ru/GSYCEQ
43. Guan, R., Pan, L., Yu, Z., Liu, Z., Shi, Q., & Li, J. (2023). Clinical study of «Jiaotai Pill» combined with head massage with 5-tone rhythm on insomnia patients of heart-kidney disharmony type. *Medicine (Baltimore)*, *102*(1), e32645. DOI: https://doi.org/10.1097/MD.0000000000032645. EDN: https://elibrary.ru/SCARNC
44. Hachul, H., Oliveira, D. S., Bittencourt, L. R., Andersen, M. L., & Tufik, S. (2014). The beneficial effects of massage therapy for insomnia in postmeno-

pausal women. *Sleep Science*, *7*(2), 114–116. DOI: https://doi.org/10.1016/j.slsci.2014.09.005

45. Her, J., & Cho, M. K. (2021). Effect of aromatherapy on sleep quality of adults and elderly people: a systematic literature review and meta-analysis. *Complementary Therapies in Medicine*, *60*, 102739. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ctim.2021.102739. EDN: https://elibrary.ru/SPWHFL
46. Hong, J. K., & Yoon, I. Y. (2024). Efficacy of cranial electrotherapy stimulation on mood and sense of well-being in people with subclinical insomnia. *Journal of Sleep Research*, *33*(1), e13978. DOI: https://doi.org/10.1111/jsr.13978. EDN: https://elibrary.ru/ESTQGS
47. Husak, A. J., & Bair, M. J. (2020). Chronic pain and sleep disturbances: a pragmatic review of their relationships, comorbidities, and treatments. *Pain Medicine*, *21*, 1142–1152. DOI: https://doi.org/10.1093/pm/pnz343. EDN: https://elibrary.ru/FLSUMG
48. Iber, C., Davies, S. F., & Mahowald, M. W. (1989). Nocturnal rocking bed therapy: improvement in sleep fragmentation in patients with respiratory muscle weakness. *Sleep*, *12*(5), 405–412. DOI: https://doi.org/10.1093/sleep/12.5.405
49. Jespersen, K. V., Pando-Naude, V., Koenig, J., Jennum, P., & Vuust, P. (2022). Listening to music for insomnia in adults. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, *8*(8), CD010459. DOI: https://doi.org/10.1002/14651858.CD010459.pub3. EDN: https://elibrary.ru/MYBHYG
50. Jiang, C. G., Zhang, T., Yue, F. G., Yi, M. L., & Gao, D. (2013). Efficacy of repetitive transcranial magnetic stimulation in the treatment of patients with chronic primary insomnia. *Cell Biochemistry and Biophysics*, *67*(1), 169–173. DOI: https://doi.org/10.1007/s12013-013-9529-4. EDN: https://elibrary.ru/DBHQSF
51. Jie Xi, J. A., Tan, J., Cai, J. S., & Ignacio, J. (2023). Effectiveness of aromatherapy on anxiety and sleep quality among adult patients admitted into intensive care units: a systematic review. *Intensive and Critical Care Nursing*, *76*, 103396. DOI: https://doi.org/10.1016/j.iccn.2023.103396
52. Jun, J., Kapella, M. C., & Hershberger, P. E. (2021). Non-pharmacological sleep interventions for adult patients in intensive care Units: a systematic review. *Intensive and Critical Care Nursing*, *67*, 103124. DOI: https://doi.org/10.1016/j.iccn.2021.103124. EDN: https://elibrary.ru/YGGGIB
53. Kay-Stacey, M., & Attarian, H. (2016). Advances in the management of chronic insomnia. *BMJ*, *354*. DOI: https://doi.org/10.1136/bmj.i2123
54. Kennedy, K. E. R., Wills, C. C. A., Holt, C., & Grandner, M. A. (2023). A randomized, sham-controlled trial of a novel near-infrared phototherapy device on

sleep and daytime function. *Journal of Clinical Sleep Medicine*, *19*(9), 1669–1675. DOI: https://doi.org/10.5664/jcsm.10648. EDN: https://elibrary.ru/AHVLWT

55. Kennerly, R. (2004). QEEG analysis of cranial electrotherapy: a pilot study. *Journal of Neurotherapy*, *8*, 112–113. Presented at the International Society for Neuronal Regulation Annual Conference.
56. Kirsch, D. L., & Nichols, F. (2013). Cranial electrotherapy stimulation for treatment of anxiety, depression, and insomnia. *Psychiatric Clinics of North America*, *36*(1), 169–176. DOI: https://doi.org/10.1016/j.psc.2013.01.006
57. Kräuchi, K., & Deboer, T. (2011). Body temperature, sleep, and hibernation. In *Principles and Practice of Sleep Medicine* (pp. 323–334). Elsevier. DOI: https://doi.org/10.1016/B978-1-4160-6645-3.00028-1
58. Krone, L. B., Fehér, K. D., Rivero, T., & Omlin, X. (2023). Brain stimulation techniques as novel treatment options for insomnia: a systematic review. *Journal of Sleep Research*, *32*(6), e13927. DOI: https://doi.org/10.1111/jsr.13927. EDN: https://elibrary.ru/TOIWKI
59. Kuderer, S., Vagedes, K., Szöke, H., Kohl, M., Joos, S., Gündling, P. W., & Vagedes, J. (2022). Do ginger footbaths improve symptoms of insomnia more than footbaths with warm water only? — A randomized controlled study. *Complementary Therapies in Medicine*, *67*, 102834. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ctim.2022.102834. EDN: https://elibrary.ru/VIVDNO
60. Kudo, Y., & Sasaki, M. (2020). Effect of a hand massage with a warm hand bath on sleep and relaxation in elderly women with disturbance of sleep: a crossover trial. *Japanese Journal of Nursing Science*, *17*(3), e12327. DOI: https://doi.org/10.1111/jjns.12327. EDN: https://elibrary.ru/UPJLJD
61. Lanza, G., Fisicaro, F., Cantone, M., Pennisi, M., Cosentino, F. II, Lanuzza, B., Tripodi, M., Bella, R., Paulus, W., & Ferri, R. (2023). Repetitive transcranial magnetic stimulation in primary sleep disorders. *Sleep Medicine Reviews*, *67*, 101735. DOI: https://doi.org/10.1016/j.smrv.2022.101735. EDN: https://elibrary.ru/NLRVXV
62. Lefaucheur, J. P., Aleman, A., Baeken, C., Benninger, D. H., Brunelin, J., Di Lazzaro, V., Filipović, S. R., Grefkes, C., Hasan, A., Hummel, F. C., Jääskeläinen, S. K., Langguth, B., Leocani, L., Londero, A., Nardone, R., Nguyen, J. P., Nyffeler, T., Oliveira-Maia, A. J., Oliviero, A., Padberg, F., Palm, U., Paulus, W., Poulet, E., Quartarone, A., Rachid, F., Rektorová, I., Rossi, S., Sahlsten, H., Schecklmann, M., Szekely, D., & Ziemann, U. (2020). Evidence-based guidelines on the therapeutic use of repetitive transcranial magnetic stimulation (rTMS): an update (2014–2018). *Clinical Neurophysiology*, *131*(2), 474–528.

DOI: https://doi.org/10.1016/j.clinph.2019.11.002. EDN: https://elibrary.ru/HEGMNF

63. Li, T., Wang, W., Guo, Q., Li, J., Tang, T., Wang, Y., Liu, D., Yang, K., Li, J., Deng, K., Wang, F., Li, H., Wu, Z., Guo, J., Guo, D., Shi, Y., Zou, J., Sun, J., Zhang, X., & Yang, M. (2024). Rosemary (Rosmarinus officinalis L.) hydrosol based on serotonergic synapse for insomnia. *Journal of Ethnopharmacology*, *318*(Part B), 116984. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jep.2023.116984. EDN: https://elibrary.ru/FOWYMT
64. Liao, J., Wang, S., Zhou, B., Liang, W., Ma, P., Lin, M., Lin, W., Li, C., Zhang, X., Li, H., Cui, Y., Hu, J., Qin, Y., Deng, Y., Fu, A., Zhu, T., Zhang, S., Qu, Y., Xing, L., Li, W., Feng, F., Yao, X., Zhang, G., & Pan, J. (2023). Efficacy and safety of pulse magnetic therapy system in insomnia disorder: a multicenter, randomized, double-blind, placebo-controlled trial. *Psychiatry Investigation*, *20*(6), 559–566. DOI: https://doi.org/10.30773/pi.2022.0362. EDN: https://elibrary.ru/IDEYIS
65. Liao, W. C., Wang, L., Kuo, C. P., Lo, C., Chiu, M. J., & Ting, H. (2013). Effect of a warm footbath before bedtime on body temperature and sleep in older adults with good and poor sleep: an experimental crossover trial. *International Journal of Nursing Studies*, *50*(12), 1607–1616. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijnurstu.2013.04.006
66. Luo, J., & Jiang, W. (2022). A critical review on clinical evidence of the efficacy of lavender in sleep disorders. *Phytotherapy Research*, *36*(6), 2342–2351. DOI: https://doi.org/10.1002/ptr.7448. EDN: https://elibrary.ru/CFBCHW
67. Matsui, M., Pelle, E., Dong, K., & Pernodet, N. (2016). Biological rhythms in the skin. *International Journal of Molecular Sciences*, *17*, 801. DOI: https://doi.org/10.3390/ijms17060801
68. Nardon, R., Nardone, A. B., Holler, Y., & Brigo, F. (2013). Transcranial magnetic stimulation and sleep disorders: pathophysiologic insights. *Sleep Medicine*, *14*(11), 1047–1058. DOI: https://doi.org/10.1016/j.sleep.2013.04.025
69. Nardone, R., Sebastianelli, L., Versace, V., Brigo, F., Golaszewski, S., Pucks-Faes, E., Saltuari, L., & Trinka, E. (2020). Effects of repetitive transcranial magnetic stimulation in subjects with sleep disorders. *Sleep Medicine*, *71*, 113–121. DOI: https://doi.org/10.1016/j.sleep.2020.01.028. EDN: https://elibrary.ru/PQUABM
70. Oliveira, D., Hachul, H., Tufik, S., & Bittencourt, L. (2011). Effect of massage in postmenopausal women with insomnia: a pilot study. *Clinics (São Paulo)*, *66*(2), 343–346. DOI: https://doi.org/10.1590/s1807-59322011000200026
71. Perlis, M. L., Posner, D., Riemann, D., Bastien, C. H., Teel, J., & Thase, M. (2022). Insomnia. *The Lancet*, *400*, 1047–1060. DOI: https://doi.org/10.1016/s0140-6736(22)00879-0. EDN: https://elibrary.ru/YLDHBC

72. Pigarev, I. N., & Pigareva, M. L. (2018). Therapeutic effects of electrical stimulation: interpretations and predictions based on the visceral theory of sleep. *Frontiers in Neuroscience*, *12*, 65. DOI: https://doi.org/10.3389/fnins.2018.00065. EDN: https://elibrary.ru/LZCIXZ
73. Porcheron, A., Latreille, J., Sauvet, F., & Bardel, M. H. (2024). Evaluation of a daily facial massage on perceived sleep quality and well-being: a pilot study. *International Journal of Cosmetic Science*. DOI: https://doi.org/10.1111/ics.12963. EDN: https://elibrary.ru/WYIRSJ
74. Rezaei, R., Sharifnia, H., Nazari, R., & Saatsaz, S. (2023). Bedtime massage intervention for improving infant and mother sleep condition: a randomized controlled trial. *Journal of Neonatal Perinatal Medicine*, *16*(2), 271–278. DOI: https://doi.org/10.3233/NPM-210964. EDN: https://elibrary.ru/SDHFLY
75. Riemann, D., Espie, C. A., Altena, E., Arnardottir, E. S., Baglioni, C., Bassetti, C. L. A., Bastien, C., Berzina, N., Bjorvatn, B., Dikeos, D., Dolenc Groselj, L., Ellis, J. G., Garcia-Borreguero, D., Geoffroy, P. A., Gjerstad, M., Gonçalves, M., Hertenstein, E., Hoedlmoser, K., Hion, T., Holzinger, B., Janku, K., Jansson-Fröjmark, M., Järnefelt, H., Jernelöv, S., Jennum, P. J., Khachatryan, S., Krone, L., Kyle, S. D., Lancee, J., Leger, D., Lupusor, A., Marques, D. R., Nissen, C., Palagini, L., Paunio, T., Perogamvros, L., Pevernagie, D., Schabus, M., Shochat, T., Szentkiralyi, A., Van Someren, E., van Straten, A., Wichniak, A., Verbraecken, J., & Spiegelhalder, K. (2023). The European Insomnia Guideline: an update on the diagnosis and treatment of insomnia 2023. *Journal of Sleep Research*, *32*(6), e14035. PMID: 38016484. DOI: https://doi.org/10.1111/jsr.14035. EDN: https://elibrary.ru/AKSXSM
76. Rogers, N. L., Bowes, J., Lushington, K., & Dawson, D. (2007). Thermoregulatory changes around the time of sleep onset. *Physiology & Behavior*, *90*(4), 643–647. DOI: https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2006.11.018
77. Samuel, S. R., Gururaj, R., Kumar, K. V., Vira, P., Saxena, P. U. P., & Keogh, J. W. L. (2021). Randomized control trial evidence for the benefits of massage and relaxation therapy on sleep in cancer survivors — a systematic review. *Journal of Cancer Survivorship*, *15*(5), 799–810. DOI: https://doi.org/10.1007/s11764-020-00972-x. EDN: https://elibrary.ru/ZZSJAS
78. Schiff, A. (2006). Rückenmassage und verwandte Techniken zur Förderung des Schlafes bei älteren Menschen [Back massage and similar techniques to promote sleep in elderly people]. *Pflege*, *19*(3), 163–173. DOI: https://doi.org/10.1024/1012-5302.19.3.163
79. Shakhnarovich, V. M., Indursky, P. A., Dementienko, V. V., & Markelov, V. V. (2017). The phenomenon of weak, unawakening afferent signals involvement

in synchronization mechanisms of neuron activity during delta sleep. *International Journal of Sleep Disorders*, *1*(1), 007–012.

80. Shao, Z., Guo, Y., Yue, L., Liu, X., Liu, J., Zhao, X., Sheng, X., Yu, D., Zhu, Y., & Yuan, K. (2024). Comparisons of transcranial alternating current stimulation and repetitive transcranial magnetic stimulation treatment therapy for insomnia: a pilot study. *General Psychiatry*, *37*(1), e101184. DOI: https://doi.org/10.1136/gpsych-2023-101184. EDN: https://elibrary.ru/QFNAYJ
81. Shealy, C. N., Cady, R. K., Culver-Veehoff, D., Cox, R., & Liss, S. (1998). Cerebrospinal fluid and plasma neurochemicals: response to cranial electrical stimulation. *Journal of Neurological and Orthopaedic Medicine and Surgery*, *18*(2), 94–97.
82. Stavinoha, P. L., Olsthoorn, I. M., Swartz, M. C., Nowakowski, S., Wells, S. J., Hicklen, R. S., Sheikh, I., & Jang, H. J. (2021). Non-pharmacological sleep interventions for pediatric cancer patients and survivors: a systematic review protocol. *Systematic Reviews*, *10*(1), 166. DOI: https://doi.org/10.1186/s13643-021-01724-3. EDN: https://elibrary.ru/XCHBQN
83. Sun, N., He, Y., Wang, Z., Zou, W., & Liu, X. (2021). The effect of repetitive transcranial magnetic stimulation for insomnia: a systematic review and meta-analysis. *Sleep Medicine*, *77*, 226–237. DOI: https://doi.org/10.1016/j.sleep.2020.05.020. EDN: https://elibrary.ru/RCWILQ
84. Tamaoki, S., Matsumoto, S., Sasa, N., Hoei, T., Tojo, R., Nakamura, T., & Aoyagi, Y. (2023). Effects of sodium bicarbonate bath on the quality of sleep: an assessor-blinded, randomized, controlled, pilot clinical trial. *Complementary Therapies in Clinical Practice*, *50*, 101714. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ctcp.2022.101714. EDN: https://elibrary.ru/ZHUIIR
85. Tan, J. X. J., Cai, J. S., & Ignacio, J. (2023). Effectiveness of aromatherapy on anxiety and sleep quality among adult patients admitted into intensive care units: a systematic review. *Intensive and Critical Care Nursing*, *76*, 103396. DOI: https://doi.org/10.1016/j.iccn.2023.103396. EDN: https://elibrary.ru/ZEIDTM
86. Tan, X. Y. J., Choong, S. Y. X., Cheng, L. J., & Lau, Y. (2021). Relaxation interventions for improving sleep outcomes in perinatal women: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *Midwifery*, *103*, 103151. DOI: https://doi.org/10.1016/j.midw.2021.103151. EDN: https://elibrary.ru/OZZAPG
87. Tang, Y., Gong, M., Qin, X., Su, H., Wang, Z., & Dong, H. (2021). The therapeutic effect of aromatherapy on insomnia: a meta-analysis. *Journal of Affective Disorders*, *288*, 1–9. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jad.2021.03.066. EDN: https://elibrary.ru/SDCKVV

88. Teirich-Leube, H. (1969). Bindegewebsmassage bei Schlafstörungen [Massage of the connective tissue in sleep disorders]. *Hippokrates*, *40*(13), 511–514. PMID: 5807829 (in German).
89. Transcranial Magnetic Stimulation for Treatment of Insomnia (TMSI). An open label trial of sequential bifrontal low frequency repetitive transcranial magnetic stimulation (r-TMS) in the treatment of primary insomnia. *US Clinical Trials Registry*. Clinical Trial NCT02196025. Updated: September 2, 2021. Sponsor: University of Florida.
90. Vanderlinden, J., Boen, F., & Van Uffelen, J. G. Z. Z. (2020). Effects of physical activity programs on sleep outcomes in older adults: a systematic review. *International Journal of Behavioral Nutrition and Physical Activity*, *17*, 11. DOI: https://doi.org/10.1186/s12966-020-0913-3. EDN: https://elibrary.ru/CCVSMO
91. Wang, S., Lan, Y., Liu, Z., Xu, S., & Wu, X. (2023). Effects of different interventions on insomnia in adults: systematic review and network meta-analysis. *Journal of Psychiatric Research*, *165*, 140–149. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jpsychires.2023.07.004. EDN: https://elibrary.ru/XMOXJH
92. Wu, H., Lv, J., Liu, M., Wu, Y., Qu, Y., Ji, L., & Lan, L. (2021). The long-term effect of repetitive transcranial magnetic stimulation in the treatment of intractable insomnia. *Sleep Medicine*, *85*, 309–312. DOI: https://doi.org/10.1016/j.sleep.2021.07.018. EDN: https://elibrary.ru/LRLZJZ
93. Yang, B., Qin, Q. Z., Han, L., Lin, J., & Chen, Y. (2018). Spa therapy (balneotherapy) relieves mental stress, sleep disorder, and general health problems in sub-healthy people. *International Journal of Biometeorology*, *62*, 261–272. DOI: https://doi.org/10.1007/s00484-017-1447-5. EDN: https://elibrary.ru/TWWWRP
94. Uslu, Y., Akbayrak, H., Ortahisar, B. K., & Barak, T. H. (2024). The effect of lavender foot baths on postoperative pain and sleep quality in comparison with foot baths with warm water only: a prospective randomized controlled study. *Explore*, *20*(3), 385–391. DOI: https://doi.org/10.1016/j.explore.2023.10.003
95. Nasiri Lari, Z., Hajimonfarednejad, M., Riasatian, M. S., Abolhassanzadeh, Z., Iraji, A., Vojoud, M., Heydari, M., & Shams, M. (2020). Efficacy of inhaled *Lavandula angustifolia* Mill. essential oil on sleep quality, quality of life and metabolic control in patients with diabetes mellitus type II and insomnia. *Journal of Ethnopharmacology*, *251*, 112560. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jep.2020.112560
96. Zeitzer, J. M., Friedman, L., & Yesavage, J. A. (2011). Effectiveness of evening phototherapy for insomnia is reduced by bright daytime light exposure. *Sleep Medicine*, *12*(8), 805–807. Epub: August 19, 2011. DOI: https://doi.org/10.1016/j.sleep.2011.02.005

97. Zhong, Z. G., Cai, H., Li, X. L., & Lü, D. (2008). [Effect of acupuncture combined with massage of sole on sleeping quality of the patient with insomnia]. *Zhongguo Zhen Jiu*, *28*(6), 411–413. (in Chinese)
98. Zhong, Z. G., Cai, H., Li, X. L., & Lü, D. (2008). [Effect of acupuncture combined with massage of sole on sleeping quality of the patient with insomnia] *Zhongguo Zhen Jiu*, *28*(6), 411–413. (in Chinese)
99. Zhou, Y. F., Wei, Y. L., Zhang, P. L., Gao, S., Ning, G. L., Zhang, Z. Q., Hu, B., Wang, D. Y., Yan, M. R., & Liu, W. J. (2006). [Multi-central controlled study on three-part massage therapy for treatment of insomnia of deficiency of both the heart and spleen] *Zhongguo Zhen Jiu*, *26*(6), 385–388. (in Chinese)

References

1. Belova, A. N., & Baldova, S. N. (2015). Transcranial magnetic stimulation: clinical application and scientific prospects. *Advances in Modern Natural Science*, *(9-1)*, 34–42. EDN: https://elibrary.ru/UNXDDR
2. Blynskiy, F. Yu., & Shkuratov, A. V. (2015). Autonomous system for low-frequency pulsed magnetotherapy. *Vectors of Well-Being: Economy and Society*, *(Special Issue)*. EDN: https://elibrary.ru/UBTJWN
3. Byalovskiy, Yu., Bulatetskiy, S., Ivanov, A., Deryagina, L., Glushkova, E., & Rakitina, I. (2019). Transcranial electrical stimulation as an effective physiotherapeutic method. *Vrach*, *30*(1), 17–26. https://doi.org/10.29296/25877305-2019-01-03. EDN: https://elibrary.ru/YVJCWD
4. Vydrenkova, T. M. (2024). Massage as a business: research on market trends and consumer preferences. *Bulletin of Science*, *2*(4), 37–44. https://doi.org/10.24412/2712-8849-2024-473-37-44. EDN: https://elibrary.ru/BJGNXB
5. Gilinskaya, N. Yu. (1998). Magnetotherapy for nervous system diseases. *Almanac of Clinical Medicine*, *(1)*. EDN: https://elibrary.ru/HZDFIL
6. Goryaev, A. G., & Kulishova, T. V. (2021). Optimization of complex spa treatment for patients with chronic insomnia by including transcranial magnetotherapy. *Bulletin of Rehabilitation Medicine*, *20*(2), 118–125. https://doi.org/10.38025/2078-1962-2021-20-2-118-125. EDN: https://elibrary.ru/WHIEGE
7. Goryaev, A. G., & Kulishova, T. V. (2016). Pathogenetic rationale for spa treatment including nitrogen-siliceous low-radon baths and transcranial magnetotherapy in patients. *Cardiovascular Therapy and Prevention*, *(5)*, 41.
8. Zakharov, Yu. B., Kruglikova, A. A., Bilenko, N. P., & Pykhalova, N. E. (2019). The influence of magnetic storms on the human body. *Modern Problems of Physics, Biophysics and Infocommunication Technologies*, *(8)*. EDN: https://elibrary.ru/OQRLEV

9. Zakharov, Yu. B., Kruglikova, A. A., Pykhalova, N. E., Sukhikh, S. A., Zakharov, M. Yu., Nenashev, D. S., & Shilov, V. P. (2021). Some features of the influence of magnetic storms on the human body. *Modern Problems of Physics, Biophysics and Infocommunication Technologies*, *(11)*. EDN: https://elibrary.ru/VFRTWH
10. Ibragimova, A. G. (1967). Electro-sleep and electro-anesthesia. *Kazan Medical Journal*, *48*(3), 108–110.
11. Ostroumova, O. D., Kochetkov, A. I., Ebzeeva, E. Yu., & Pereverzev, A. P. (2021). *Insomnia and polymorbidity: textbook*. Moscow: FSBEI FPE RMACPE of the Ministry of Health of Russia. 76 pp. ISBN 978-5-7249-3183-0
12. Kulishova, T. V., Goryaev, A. G., Babushkin, I. E., & Tabashnikova, N. A. (2023). Immediate and long-term results of studying sleep quality and quality of life in patients with chronic insomnia after inclusion of natural factors. *Modern Problems of Science and Education*, *(5)*. https://doi.org/10.17513/spno.32990. EDN: https://elibrary.ru/AXTTWI
13. Kulishova, T. V., Goryaev, A. G., Babushkin, I. E., & Tabashnikova, N. A. (2023). Effectiveness of nitrogen-siliceous low-radon baths in complex treatment of patients with chronic insomnia. *Modern Problems of Science and Education*, *(6)*. https://doi.org/10.17513/spno.33112. EDN: https://elibrary.ru/XJBPXK
14. Kurushina, O. V., Barulin, A. E., & Bagirova, D. Ya. (2019). Modern approaches to insomnia treatment in general therapeutic practice. *Medical Council*, *(6)*, 20–26. https://doi.org/10.21518/2079-701X-2019-6-20-26. EDN: https://elibrary.ru/ZGZRAD
15. Kulishova, T. V., & Goryaev, A. G. (2020). *Method for treating patients with chronic insomnia* (RF Patent for Invention No. 2714296; Bulletin No. 5 dated 13.02.2020).
16. Dunaevskiy, L. V., & Indurskiy, P. A. (2007). *Method for normalizing sleep architecture in patients with depression, anxiety disorders, obsessive-compulsive disorders, and severe insomnias via pulsed magnetic and electrical stimulation during slow-wave phases of human night sleep* (RF Patent for Invention No. 2304988; Bulletin No. 24 dated 27.08.2007).
17. Ponomarenko, G. N., Bolotova, N. V., & Raygorodskiy, Yu. M. (2016). *Transcranial magnetotherapy*. Saint Petersburg: Chelovek. 156 pp.
18. Soboleva, E. M., & Kaladze, N. N. (2021). Electro-sleep as a method of pathogenetic therapy in juvenile rheumatoid arthritis. *Bulletin of Physiotherapy and Balneology*, *(2)*. https://doi.org/10.37279/2413-0478-2021-27-2-39-42. EDN: https://elibrary.ru/WWSSZS

19. Soltangishieva, A. A., Bat, N. M., & Nikiforova, E. B. (2023). Analysis of scientific recommendations for drug therapy of insomnia. *Bulletin of Smolensk State Medical Academy*, *(3)*, 92–101. https://doi.org/10.37903/vsgma.2023.3.13. EDN: https://elibrary.ru/DXWAZJ
20. Aghamohammadi, V., Salmani, R., Ivanbagha, R., Effatidaryani, F., & Nasiri, K. (2020). Footbath as a safe, simple, and non-pharmacological method to improve sleep quality of menopausal women. *Research in Nursing & Health*, *43*, 621–628. DOI: https://doi.org/10.1002/nur.22082. EDN: https://elibrary.ru/YDIZJK
21. Albathi, M., & Agrawal, Y. (2017). Vestibular vertigo is associated with abnormal sleep duration. *Journal of Vestibular Research*, *27*(2–3), 127–135.
22. American Academy of Sleep Medicine. (2014). *International classification of sleep disorders* (3rd ed.: diagnostic and coding manual). Darien, IL: American Academy of Sleep Medicine.
23. Amici, R., Cerri, M., Ocampo-Garcés, A., Baracchi, F., Dentico, D., & Jones, C. A. (2Desktop). Cold exposure and sleep in the rat: REM sleep homeostasis and body size. *Sleep*, *31*, 708–715. DOI: https://doi.org/10.1093/sleep/31.5.708
24. An, J., Lee, I., & Yi, Y. (2019). The thermal effects of water immersion on health outcomes: an integrative review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *16*, 1280. DOI: https://doi.org/10.3390/ijerph16071280
25. Aseem, A., Chaudhry, N., & Hussain, M. E. (2022). Cranial electrostimulation improves slow wave sleep in collegiate population: a polysomnographic study. *Sleep Science*, *15*(1), 88–94. DOI: https://doi.org/10.5935/1984-0063.20220029. EDN: https://elibrary.ru/PZDPQP
26. Aseem, A., & Hussain, M. (2019). Impact of cranial electrostimulation on sleep: a systematic review. *Sleep and Vigilance*, *3*. DOI: https://doi.org/10.1007/s41782-019-00075-3
27. Bach, V., Telliez, F., & Libert, J. P. (2002). The interaction between sleep and thermoregulation in adults and neonates. *Sleep Medicine Reviews*, *6*, 481–492. DOI: https://doi.org/10.1053/smrv.2001.0177
28. Baek, J. Y., Lee, E., Gil, B., Jung, H. W., & Jang, I. Y. (2022). Clinical effects of using a massage chair on stress measures in adults: a pilot randomized controlled trial. *Complementary Therapies in Medicine*, *66*, 102825. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ctim.2022.102825. EDN: https://elibrary.ru/RJFHFN
29. Bonnet, M. H., & Arand, D. L. (2010). Hyperarousal and insomnia: state of the science. *Sleep Medicine Reviews*, *14*(1), 9–15. DOI: https://doi.org/10.1016/j.smrv.2009.05.002

30. Castelli, L., Galasso, L., Mulè, A., Ciorciari, A., Fornasini, F., Montaruli, A., Roveda, E., & Esposito, F. (2022). Sleep and spa therapies: what is the role of balneotherapy associated with exercise? A systematic review. *Frontiers in Physiology*, *13*, 964232. DOI: https://doi.org/10.3389/fphys.2022.964232. EDN: https://elibrary.ru/DQISXP
31. Cheong, M. J., Kim, S., Kim, J. S., Lee, H., Lyu, Y. S., Lee, Y. R., Jeon, B., & Kang, H. W. (2021). A systematic literature review and meta-analysis of the clinical effects of aroma inhalation therapy on sleep problems. *Medicine (Baltimore)*, *100*(9), e24652. DOI: https://doi.org/10.1097/MD.0000000000024652. EDN: https://elibrary.ru/IHTIVI
32. Cheung, T., Lam, J. Y. T., Fong, K. H., Cheng, C. P.-W., Ho, A., Sittlington, J., Xiang, Y.-T., & Li, T. M. H. (2023). Evaluating the efficacy of electrical vestibular stimulation (VeNS) on insomnia adults: study protocol of a double-blinded, randomized, sham-controlled trial. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *20*(4), 3577. DOI: https://doi.org/10.3390/ijerph20043577. EDN: https://elibrary.ru/QJCXQT
33. Chopra, A., Singal, P., & Kodya, S. (2023). Impact of deep transcranial magnetic stimulation on insomnia outcomes in patients with treatment-resistant depression: a retrospective study. *Journal of Clinical Sleep Medicine*. DOI: https://doi.org/10.5664/jcsm.10954. EDN: https://elibrary.ru/GCOIOQ
34. De Souza, T. P. B., Kurebayashi, L. F. S., de Souza-Talarico, J. N., & Turrini, R. N. T. (2021). The effectiveness of chair massage on stress and pain in oncology. *International Journal of Therapeutic Massage & Bodywork*, *14*(3), 27–38. DOI: https://doi.org/10.3822/ijtmb.v14i3.619. EDN: https://elibrary.ru/NFPSOF
35. Drager, L. F., Assis, M., Bacelar, A. F. R., Poyares, D. L. R., Conway, S. G., Pires, G. N., de Azevedo, A. P., Carissimi, A., Eckeli, A. L., Pentagna, Á., Almeida, C. M. O., Franco, C. M. R., Sobreira, E. S. T., Stelzer, F. G., Mendes, G. M., Minhoto, G. R., Linares, I. M. P., Sousa, K. M. M., Gitaí, L. L. G., Sukys-Claudino, L., Sobreira-Neto, M. A., Zanini, M. A., Margis, R., & Martinez, S. C. G. (2023). 2023 guidelines on the diagnosis and treatment of insomnia in adults — Brazilian Sleep Association. *Sleep Science*, *16*(Suppl 2), 507–549. DOI: https://doi.org/10.1055/s-0043-1776281
36. Ferdjallah, M., Bostick, F. X., & Barr, R. E. (1996). Potential and current density distributions of cranial electrotherapy stimulation (CES) in a four-concentric-spheres model. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, *43*(9), 939–943. DOI: https://doi.org/10.1109/10.532128
37. Feusner, J. D., Madsen, S., Moody, T. D., Bohon, C., Hembacher, E., Bookheimer, S. Y., & Bystritsky, A. (2012). Effects of cranial electrotherapy

stimulation on resting state brain activity. *Brain and Behavior*, *2*(3), 211–220. DOI: https://doi.org/10.1002/brb3.45

38. Forbes, D., Culum, I., Lischka, A. R., Morgan, D. G., Peacock, S., Forbes, J., & Forbes, S. (2009). Light therapy for managing cognitive, sleep, functional, behavioural, or psychiatric disturbances in dementia. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, (4), CD003946. DOI: https://doi.org/10.1002/14651858.CD003946.pub3
39. Friedman, L., Zeitzer, J. M., Kushida, C., Zhdanova, I., Noda, A., Lee, T., Schneider, B., Guilleminault, C., Sheikh, J., & Yesavage, J. A. (2009). Scheduled bright light for treatment of insomnia in older adults. *Journal of the American Geriatrics Society*, *57*(3), 441–452. DOI: https://doi.org/10.1111/j.1532-5415.2008.02164.x
40. Gooley, J. J. (2008). Treatment of circadian rhythm sleep disorders with light. *Annals of the Academy of Medicine, Singapore*, *37*(8), 669–676. PMID: 18797560
41. Goothy, S. S. K., & McKeown, J. (2020). Modulation of sleep using electrical vestibular nerve stimulation prior to sleep onset: a pilot study. *Journal of Basic and Clinical Physiology and Pharmacology*, *32*(2), 19–23. DOI: https://doi.org/10.1515/jbcpp-2020-0019. EDN: https://elibrary.ru/DCHJKG
42. Goothy, S. S. K., Vijayaraghavan, R., & Chakraborty, H. (2023). A randomized controlled trial to evaluate the efficacy of electrical vestibular nerve stimulation (VeNS), compared to a sham control for the management of sleep in young adults. *Journal of Basic and Clinical Physiology and Pharmacology*, *34*(3), 391–399. DOI: https://doi.org/10.1515/jbcpp-2023-0036. EDN: https://elibrary.ru/GSYCEQ
43. Guan, R., Pan, L., Yu, Z., Liu, Z., Shi, Q., & Li, J. (2023). Clinical study of «Jiaotai Pill» combined with head massage with 5-tone rhythm on insomnia patients of heart-kidney disharmony type. *Medicine (Baltimore)*, *102*(1), e32645. DOI: https://doi.org/10.1097/MD.0000000000032645. EDN: https://elibrary.ru/SCARNC
44. Hachul, H., Oliveira, D. S., Bittencourt, L. R., Andersen, M. L., & Tufik, S. (2014). The beneficial effects of massage therapy for insomnia in postmenopausal women. *Sleep Science*, *7*(2), 114–116. DOI: https://doi.org/10.1016/j.slsci.2014.09.005
45. Her, J., & Cho, M. K. (2021). Effect of aromatherapy on sleep quality of adults and elderly people: a systematic literature review and meta-analysis. *Complementary Therapies in Medicine*, *60*, 102739. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ctim.2021.102739. EDN: https://elibrary.ru/SPWHFL

46. Hong, J. K., & Yoon, I. Y. (2024). Efficacy of cranial electrotherapy stimulation on mood and sense of well-being in people with subclinical insomnia. *Journal of Sleep Research*, *33*(1), e13978. DOI: https://doi.org/10.1111/jsr.13978. EDN: https://elibrary.ru/ESTQGS
47. Husak, A. J., & Bair, M. J. (2020). Chronic pain and sleep disturbances: a pragmatic review of their relationships, comorbidities, and treatments. *Pain Medicine*, *21*, 1142–1152. DOI: https://doi.org/10.1093/pm/pnz343. EDN: https://elibrary.ru/FLSUMG
48. Iber, C., Davies, S. F., & Mahowald, M. W. (1989). Nocturnal rocking bed therapy: improvement in sleep fragmentation in patients with respiratory muscle weakness. *Sleep*, *12*(5), 405–412. DOI: https://doi.org/10.1093/sleep/12.5.405
49. Jespersen, K. V., Pando-Naude, V., Koenig, J., Jennum, P., & Vuust, P. (2022). Listening to music for insomnia in adults. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, *8*(8), CD010459. DOI: https://doi.org/10.1002/14651858.CD010459.pub3. EDN: https://elibrary.ru/MYBHYG
50. Jiang, C. G., Zhang, T., Yue, F. G., Yi, M. L., & Gao, D. (2013). Efficacy of repetitive transcranial magnetic stimulation in the treatment of patients with chronic primary insomnia. *Cell Biochemistry and Biophysics*, *67*(1), 169–173. DOI: https://doi.org/10.1007/s12013-013-9529-4. EDN: https://elibrary.ru/DBHQSF
51. Jie Xi, J. A., Tan, J., Cai, J. S., & Ignacio, J. (2023). Effectiveness of aromatherapy on anxiety and sleep quality among adult patients admitted into intensive care units: a systematic review. *Intensive and Critical Care Nursing*, *76*, 103396. DOI: https://doi.org/10.1016/j.iccn.2023.103396
52. Jun, J., Kapella, M. C., & Hershberger, P. E. (2021). Non-pharmacological sleep interventions for adult patients in intensive care Units: a systematic review. *Intensive and Critical Care Nursing*, *67*, 103124. DOI: https://doi.org/10.1016/j.iccn.2021.103124. EDN: https://elibrary.ru/YGGGIB
53. Kay-Stacey, M., & Attarian, H. (2016). Advances in the management of chronic insomnia. *BMJ*, *354*. DOI: https://doi.org/10.1136/bmj.i2123
54. Kennedy, K. E. R., Wills, C. C. A., Holt, C., & Grandner, M. A. (2023). A randomized, sham-controlled trial of a novel near-infrared phototherapy device on sleep and daytime function. *Journal of Clinical Sleep Medicine*, *19*(9), 1669–1675. DOI: https://doi.org/10.5664/jcsm.10648. EDN: https://elibrary.ru/AHVLWT
55. Kennerly, R. (2004). QEEG analysis of cranial electrotherapy: a pilot study. *Journal of Neurotherapy*, *8*, 112–113. Presented at the International Society for Neuronal Regulation Annual Conference.

56. Kirsch, D. L., & Nichols, F. (2013). Cranial electrotherapy stimulation for treatment of anxiety, depression, and insomnia. *Psychiatric Clinics of North America*, *36*(1), 169–176. DOI: https://doi.org/10.1016/j.psc.2013.01.006
57. Kräuchi, K., & Deboer, T. (2011). Body temperature, sleep, and hibernation. In *Principles and Practice of Sleep Medicine* (pp. 323–334). Elsevier. DOI: https://doi.org/10.1016/B978-1-4160-6645-3.00028-1
58. Krone, L. B., Fehér, K. D., Rivero, T., & Omlin, X. (2023). Brain stimulation techniques as novel treatment options for insomnia: a systematic review. *Journal of Sleep Research*, *32*(6), e13927. DOI: https://doi.org/10.1111/jsr.13927. EDN: https://elibrary.ru/TOIWKI
59. Kuderer, S., Vagedes, K., Szöke, H., Kohl, M., Joos, S., Gündling, P. W., & Vagedes, J. (2022). Do ginger footbaths improve symptoms of insomnia more than footbaths with warm water only? — A randomized controlled study. *Complementary Therapies in Medicine*, *67*, 102834. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ctim.2022.102834. EDN: https://elibrary.ru/VIVDNO
60. Kudo, Y., & Sasaki, M. (2020). Effect of a hand massage with a warm hand bath on sleep and relaxation in elderly women with disturbance of sleep: a crossover trial. *Japanese Journal of Nursing Science*, *17*(3), e12327. DOI: https://doi.org/10.1111/jjns.12327. EDN: https://elibrary.ru/UPJLJD
61. Lanza, G., Fisicaro, F., Cantone, M., Pennisi, M., Cosentino, F. II, Lanuzza, B., Tripodi, M., Bella, R., Paulus, W., & Ferri, R. (2023). Repetitive transcranial magnetic stimulation in primary sleep disorders. *Sleep Medicine Reviews*, *67*, 101735. DOI: https://doi.org/10.1016/j.smrv.2022.101735. EDN: https://elibrary.ru/NLRVXV
62. Lefaucheur, J. P., Aleman, A., Baeken, C., Benninger, D. H., Brunelin, J., Di Lazzaro, V., Filipović, S. R., Grefkes, C., Hasan, A., Hummel, F. C., Jääskeläinen, S. K., Langguth, B., Leocani, L., Londero, A., Nardone, R., Nguyen, J. P., Nyffeler, T., Oliveira-Maia, A. J., Oliviero, A., Padberg, F., Palm, U., Paulus, W., Poulet, E., Quartarone, A., Rachid, F., Rektorová, I., Rossi, S., Sahlsten, H., Schecklmann, M., Szekely, D., & Ziemann, U. (2020). Evidence-based guidelines on the therapeutic use of repetitive transcranial magnetic stimulation (rTMS): an update (2014–2018). *Clinical Neurophysiology*, *131*(2), 474–528. DOI: https://doi.org/10.1016/j.clinph.2019.11.002. EDN: https://elibrary.ru/HEGMNF
63. Li, T., Wang, W., Guo, Q., Li, J., Tang, T., Wang, Y., Liu, D., Yang, K., Li, J., Deng, K., Wang, F., Li, H., Wu, Z., Guo, J., Guo, D., Shi, Y., Zou, J., Sun, J., Zhang, X., & Yang, M. (2024). Rosemary (Rosmarinus officinalis L.) hydrosol based on serotonergic synapse for insomnia. *Journal of Ethnopharmacology*,

318(Part B), 116984. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jep.2023.116984. EDN: https://elibrary.ru/FOWYMT

64. Liao, J., Wang, S., Zhou, B., Liang, W., Ma, P., Lin, M., Lin, W., Li, C., Zhang, X., Li, H., Cui, Y., Hu, J., Qin, Y., Deng, Y., Fu, A., Zhu, T., Zhang, S., Qu, Y., Xing, L., Li, W., Feng, F., Yao, X., Zhang, G., & Pan, J. (2023). Efficacy and safety of pulse magnetic therapy system in insomnia disorder: a multicenter, randomized, double-blind, placebo-controlled trial. *Psychiatry Investigation*, *20*(6), 559–566. DOI: https://doi.org/10.30773/pi.2022.0362. EDN: https://elibrary.ru/IDEYIS
65. Liao, W. C., Wang, L., Kuo, C. P., Lo, C., Chiu, M. J., & Ting, H. (2013). Effect of a warm footbath before bedtime on body temperature and sleep in older adults with good and poor sleep: an experimental crossover trial. *International Journal of Nursing Studies*, *50*(12), 1607–1616. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijnurstu.2013.04.006
66. Luo, J., & Jiang, W. (2022). A critical review on clinical evidence of the efficacy of lavender in sleep disorders. *Phytotherapy Research*, *36*(6), 2342–2351. DOI: https://doi.org/10.1002/ptr.7448. EDN: https://elibrary.ru/CFBCHW
67. Matsui, M., Pelle, E., Dong, K., & Pernodet, N. (2016). Biological rhythms in the skin. *International Journal of Molecular Sciences*, *17*, 801. DOI: https://doi.org/10.3390/ijms17060801
68. Nardon, R., Nardone, A. B., Holler, Y., & Brigo, F. (2013). Transcranial magnetic stimulation and sleep disorders: pathophysiologic insights. *Sleep Medicine*, *14*(11), 1047–1058. DOI: https://doi.org/10.1016/j.sleep.2013.04.025
69. Nardone, R., Sebastianelli, L., Versace, V., Brigo, F., Golaszewski, S., Pucks-Faes, E., Saltuari, L., & Trinka, E. (2020). Effects of repetitive transcranial magnetic stimulation in subjects with sleep disorders. *Sleep Medicine*, *71*, 113–121. DOI: https://doi.org/10.1016/j.sleep.2020.01.028. EDN: https://elibrary.ru/PQUABM
70. Oliveira, D., Hachul, H., Tufik, S., & Bittencourt, L. (2011). Effect of massage in postmenopausal women with insomnia: a pilot study. *Clinics (São Paulo)*, *66*(2), 343–346. DOI: https://doi.org/10.1590/s1807-59322011000200026
71. Perlis, M. L., Posner, D., Riemann, D., Bastien, C. H., Teel, J., & Thase, M. (2022). Insomnia. *The Lancet*, *400*, 1047–1060. DOI: https://doi.org/10.1016/s0140-6736(22)00879-0. EDN: https://elibrary.ru/YLDHBC
72. Pigarev, I. N., & Pigareva, M. L. (2018). Therapeutic effects of electrical stimulation: interpretations and predictions based on the visceral theory of sleep. *Frontiers in Neuroscience*, *12*, 65. DOI: https://doi.org/10.3389/fnins.2018.00065. EDN: https://elibrary.ru/LZCIXZ

73. Porcheron, A., Latreille, J., Sauvet, F., & Bardel, M. H. (2024). Evaluation of a daily facial massage on perceived sleep quality and well-being: a pilot study. *International Journal of Cosmetic Science*. DOI: https://doi.org/10.1111/ics.12963. EDN: https://elibrary.ru/WYIRSJ
74. Rezaei, R., Sharifnia, H., Nazari, R., & Saatsaz, S. (2023). Bedtime massage intervention for improving infant and mother sleep condition: a randomized controlled trial. *Journal of Neonatal Perinatal Medicine*, *16*(2), 271–278. DOI: https://doi.org/10.3233/NPM-210964. EDN: https://elibrary.ru/SDHFLY
75. Riemann, D., Espie, C. A., Altena, E., Arnardottir, E. S., Baglioni, C., Bassetti, C. L. A., Bastien, C., Berzina, N., Bjorvatn, B., Dikeos, D., Dolenc Groselj, L., Ellis, J. G., Garcia-Borreguero, D., Geoffroy, P. A., Gjerstad, M., Gonçalves, M., Hertenstein, E., Hoedlmoser, K., Hion, T., Holzinger, B., Janku, K., Jansson-Fröjmark, M., Järnefelt, H., Jernelöv, S., Jennum, P. J., Khachatryan, S., Krone, L., Kyle, S. D., Lancee, J., Leger, D., Lupusor, A., Marques, D. R., Nissen, C., Palagini, L., Paunio, T., Perogamvros, L., Pevernagie, D., Schabus, M., Shochat, T., Szentkiralyi, A., Van Someren, E., van Straten, A., Wichniak, A., Verbraecken, J., & Spiegelhalder, K. (2023). The European Insomnia Guideline: an update on the diagnosis and treatment of insomnia 2023. *Journal of Sleep Research*, *32*(6), e14035. PMID: 38016484. DOI: https://doi.org/10.1111/jsr.14035. EDN: https://elibrary.ru/AKSXSM
76. Rogers, N. L., Bowes, J., Lushington, K., & Dawson, D. (2007). Thermoregulatory changes around the time of sleep onset. *Physiology & Behavior*, *90*(4), 643–647. DOI: https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2006.11.018
77. Samuel, S. R., Gururaj, R., Kumar, K. V., Vira, P., Saxena, P. U. P., & Keogh, J. W. L. (2021). Randomized control trial evidence for the benefits of massage and relaxation therapy on sleep in cancer survivors — a systematic review. *Journal of Cancer Survivorship*, *15*(5), 799–810. DOI: https://doi.org/10.1007/s11764-020-00972-x. EDN: https://elibrary.ru/ZZSJAS
78. Schiff, A. (2006). Rückenmassage und verwandte Techniken zur Förderung des Schlafes bei älteren Menschen [Back massage and similar techniques to promote sleep in elderly people]. *Pflege*, *19*(3), 163–173. DOI: https://doi.org/10.1024/1012-5302.19.3.163
79. Shakhnarovich, V. M., Indursky, P. A., Dementienko, V. V., & Markelov, V. V. (2017). The phenomenon of weak, unawakening afferent signals involvement in synchronization mechanisms of neuron activity during delta sleep. *International Journal of Sleep Disorders*, *1*(1), 007–012.
80. Shao, Z., Guo, Y., Yue, L., Liu, X., Liu, J., Zhao, X., Sheng, X., Yu, D., Zhu, Y., & Yuan, K. (2024). Comparisons of transcranial alternating current stimulation

and repetitive transcranial magnetic stimulation treatment therapy for insomnia: a pilot study. *General Psychiatry*, *37*(1), e101184. DOI: https://doi.org/10.1136/gpsych-2023-101184. EDN: https://elibrary.ru/QFNAYJ

81. Shealy, C. N., Cady, R. K., Culver-Veehoff, D., Cox, R., & Liss, S. (1998). Cerebrospinal fluid and plasma neurochemicals: response to cranial electrical stimulation. *Journal of Neurological and Orthopaedic Medicine and Surgery*, *18*(2), 94–97.
82. Stavinoha, P. L., Olsthoorn, I. M., Swartz, M. C., Nowakowski, S., Wells, S. J., Hicklen, R. S., Sheikh, I., & Jang, H. J. (2021). Non-pharmacological sleep interventions for pediatric cancer patients and survivors: a systematic review protocol. *Systematic Reviews*, *10*(1), 166. DOI: https://doi.org/10.1186/s13643-021-01724-3. EDN: https://elibrary.ru/XCHBQN
83. Sun, N., He, Y., Wang, Z., Zou, W., & Liu, X. (2021). The effect of repetitive transcranial magnetic stimulation for insomnia: a systematic review and meta-analysis. *Sleep Medicine*, *77*, 226–237. DOI: https://doi.org/10.1016/j.sleep.2020.05.020. EDN: https://elibrary.ru/RCWILQ
84. Tamaoki, S., Matsumoto, S., Sasa, N., Hoei, T., Tojo, R., Nakamura, T., & Aoyagi, Y. (2023). Effects of sodium bicarbonate bath on the quality of sleep: an assessor-blinded, randomized, controlled, pilot clinical trial. *Complementary Therapies in Clinical Practice*, *50*, 101714. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ctcp.2022.101714. EDN: https://elibrary.ru/ZHUIIR
85. Tan, J. X. J., Cai, J. S., & Ignacio, J. (2023). Effectiveness of aromatherapy on anxiety and sleep quality among adult patients admitted into intensive care units: a systematic review. *Intensive and Critical Care Nursing*, *76*, 103396. DOI: https://doi.org/10.1016/j.iccn.2023.103396. EDN: https://elibrary.ru/ZEIDTM
86. Tan, X. Y. J., Choong, S. Y. X., Cheng, L. J., & Lau, Y. (2021). Relaxation interventions for improving sleep outcomes in perinatal women: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *Midwifery*, *103*, 103151. DOI: https://doi.org/10.1016/j.midw.2021.103151. EDN: https://elibrary.ru/OZZAPG
87. Tang, Y., Gong, M., Qin, X., Su, H., Wang, Z., & Dong, H. (2021). The therapeutic effect of aromatherapy on insomnia: a meta-analysis. *Journal of Affective Disorders*, *288*, 1–9. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jad.2021.03.066. EDN: https://elibrary.ru/SDCKVV
88. Teirich-Leube, H. (1969). Bindegewebsmassage bei Schlafstörungen [Massage of the connective tissue in sleep disorders]. *Hippokrates*, *40*(13), 511–514. PMID: 5807829 (in German).
89. Transcranial Magnetic Stimulation for Treatment of Insomnia (TMSI). An open label trial of sequential bifrontal low frequency repetitive transcranial magnetic stimulation (r-TMS) in the treatment of primary insomnia. *US Clinical Trials*

Registry. Clinical Trial NCT02196025. Updated: September 2, 2021. Sponsor: University of Florida.

90. Vanderlinden, J., Boen, F., & Van Uffelen, J. G. Z. Z. (2020). Effects of physical activity programs on sleep outcomes in older adults: a systematic review. *International Journal of Behavioral Nutrition and Physical Activity*, *17*, 11. DOI: https://doi.org/10.1186/s12966-020-0913-3. EDN: https://elibrary.ru/CCVSMO
91. Wang, S., Lan, Y., Liu, Z., Xu, S., & Wu, X. (2023). Effects of different interventions on insomnia in adults: systematic review and network meta-analysis. *Journal of Psychiatric Research*, *165*, 140–149. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jpsychires.2023.07.004. EDN: https://elibrary.ru/XMOXJH
92. Wu, H., Lv, J., Liu, M., Wu, Y., Qu, Y., Ji, L., & Lan, L. (2021). The long-term effect of repetitive transcranial magnetic stimulation in the treatment of intractable insomnia. *Sleep Medicine*, *85*, 309–312. DOI: https://doi.org/10.1016/j.sleep.2021.07.018. EDN: https://elibrary.ru/LRLZJZ
93. Yang, B., Qin, Q. Z., Han, L., Lin, J., & Chen, Y. (2018). Spa therapy (balneotherapy) relieves mental stress, sleep disorder, and general health problems in sub-healthy people. *International Journal of Biometeorology*, *62*, 261–272. DOI: https://doi.org/10.1007/s00484-017-1447-5. EDN: https://elibrary.ru/TWWWRP
94. Uslu, Y., Akbayrak, H., Ortahisar, B. K., & Barak, T. H. (2024). The effect of lavender foot baths on postoperative pain and sleep quality in comparison with foot baths with warm water only: a prospective randomized controlled study. *Explore*, *20*(3), 385–391. DOI: https://doi.org/10.1016/j.explore.2023.10.003
95. Nasiri Lari, Z., Hajimonfarednejad, M., Riasatian, M. S., Abolhassanzadeh, Z., Iraji, A., Vojoud, M., Heydari, M., & Shams, M. (2020). Efficacy of inhaled *Lavandula angustifolia* Mill. essential oil on sleep quality, quality of life and metabolic control in patients with diabetes mellitus type II and insomnia. *Journal of Ethnopharmacology*, *251*, 112560. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jep.2020.112560
96. Zeitzer, J. M., Friedman, L., & Yesavage, J. A. (2011). Effectiveness of evening phototherapy for insomnia is reduced by bright daytime light exposure. *Sleep Medicine*, *12*(8), 805–807. Epub: August 19, 2011. DOI: https://doi.org/10.1016/j.sleep.2011.02.005
97. Zhong, Z. G., Cai, H., Li, X. L., & Lü, D. (2008). [Effect of acupuncture combined with massage of sole on sleeping quality of the patient with insomnia]. *Zhongguo Zhen Jiu*, *28*(6), 411–413. (in Chinese)
98. Zhong, Z. G., Cai, H., Li, X. L., & Lü, D. (2008). [Effect of acupuncture combined with massage of sole on sleeping quality of the patient with insomnia]. *Zhongguo Zhen Jiu*, *28*(6), 411–413. (in Chinese)

99. Zhou, Y. F., Wei, Y. L., Zhang, P. L., Gao, S., Ning, G. L., Zhang, Z. Q., Hu, B., Wang, D. Y., Yan, M. R., & Liu, W. J. (2006). [Multi-central controlled study on three-part massage therapy for treatment of insomnia of deficiency of both the heart and spleen]. *Zhongguo Zhen Jiu*, *26*(6), 385–388. (in Chinese)

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Кирюхин Олег Львович, кандидат медицинских наук, доцент кафедры факультетской терапии им. В.Я. Гармаша
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Рязанский государственный медицинский университет имени академика И.П. Павлова» Министерства здравоохранения Российской Федерации
ул. Высоковольтная, 9, г. Рязань, 390026, Российская Федерация
okiryukhin@bk.ru

Дерягина Лариса Евгеньевна, доктор медицинских наук, профессор, профессор кафедры психологии
Федеральное государственное казенное образовательное учреждение высшего образования «Московский университет Министерства внутренних дел Российской Федерации имени В.Я. Кикотя»
ул. Академика Волгина, 12, г. Москва, 117997, Российская Федерация
lderyagina@mail.ru

Булатецкий Сергей Владиславович, доктор медицинских наук, доцент, профессор кафедры патофизиологии
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Рязанский государственный медицинский университет имени академика И.П. Павлова» Министерства здравоохранения Российской Федерации
ул. Высоковольтная, 9, г. Рязань, 390026, Российская Федерация
dr_bsv@mail.ru

Глушкова Елена Павловна, кандидат медицинских наук, начальник клинического госпиталя
Федеральное казенное учреждение здравоохранения «Медико-санитарная часть Министерства внутренних дел Российской Федерации по Рязанской области»
ул. Полевая, 32, г. Рязань, 390046, Российская Федерация
drgep71@gmail.com

DATA ABOUT THE AUTHORS

Oleg L. Kiryukhin, PhD (Med. Sc.), Associate Professor, Department of Faculty Therapy named after V. Ya. Garmash
Ryazan State Medical University named after Academician I.P. Pavlov
9, Vysokovoltnaya Str., Ryazan, 390026, Russian Federation
okiryukhin@bk.ru

Larisa E. Deryagina, MD, Professor, Department of Psychology
V. Ya. Kikot Moscow University of the Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation
12, Academician Volgin Str., Moscow, 117997, Russian Federation
lderyagina@mail.ru

Sergey V. Bulatetsky, MD, Associate Professor, Professor, Department of Pathophysiology
Ryazan State Medical University named after Academician I.P. Pavlov
9, Vysokovoltnaya Str., Ryazan, 390026, Russian Federation
dr_bsv@mail.ru

Elena P. Glushkova, PhD (Med. Sc.), Head of the Clinical Hospital
Medical and Sanitary Unit of the Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation for the Ryazan Region
32, Polevaya Str., Ryazan, 390046, Russian Federation
drgep71@gmail.com

Поступила 20.10.2024 Received 20.10.2024
После рецензирования 29.12.2024 Revised 29.12.2024
Принята 15.01.2025 Accepted 15.01.2025

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-4-1217 **EDN: DXEHTR**
УДК 616.7

Научные обзоры

ПРОФИЛАКТИКА, ДИАГНОСТИКА И ЛЕЧЕНИЕ ПАТОЛОГИИ СТОПЫ, ВОЗНИКАЮЩЕЙ В РЕЗУЛЬТАТЕ СОЧЕТАННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ЖАРКОЙ ПОГОДЫ И ВЛАЖНЫХ УСЛОВИЙ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ (ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ)

В.А. Мальчевский, М.М. Муртузалиев, С.П. Сахаров, А.В. Мальчевский

Аннотация

Обоснование. Глобальное потепление климата приводит к появлению длительных периодов жаркой погоды в летнее время в РФ. Она обуславливает появление патологии, которая ранее встречалась только в тропических странах. Одной из них является патология стопы, возникающая в результате сочетанного воздействия жаркой погоды и влажных условий внешней среды. Она может встречаться у людей различных специальностей работающих во влажных условиях внешней среды. Проводя анализ литературных источников, мы выявили, отсутствие информации посвященной данной проблеме в отечественных литературных источниках.

Цель. Повысить эффективность профилактики, диагностики и лечения патологии стопы, возникающей у пациентов в результате сочетанного воздействия жаркой погоды и влажных условий внешней среды, путем информирования о данной проблеме и путях ее решения медицинских специалистов.

Материалы и методы. Выполнен поиск публикаций в базах данных РИНЦ, PubMed, Cochrane и Scopus по ключевому слову «тропическая стопа». Выявлено всего 29 публикаций, из которых отобрано 24.

Результаты. Проведен анализ информации и сформулирован современный взгляд на патогенез, диагностику, лечение и профилактику «Warm water immersion foot» (WWIF) и «Tropical immersion foot» (TIF). Выявлено, что патофизиология данных заболеваний, изучена не достаточно. Отмечено, что существующие меры профилактики и лечения основаны на клиническом опыте, а не на принципах доказательной медицины.

Заключение. В связи с глобальным потеплением климата, необходимость проведения дальнейших научных исследований, направленных комплексное всестороннее изучение данной патологии и разработки на их основе ее эффективной профилактики и лечения, безусловно актуально.

Ключевые слова: стопа, погруженная в теплую воду; WWIF; тропическая иммерсионная стопа; TIF; обзор

Для цитирования. Мальчевский, В. А., Муртузалиев, М. М., Сахаров, С.П., & Мальчевский, А. В. (2025). Профилактика, диагностика и лечение патологии стопы, возникающей в результате сочетанного воздействия жаркой погоды и влажных условий внешней среды (обзор литературы). *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(4), 659-672. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-4-1217

Scientific Reviews

PREVENTION, DIAGNOSIS AND TREATMENT OF FOOT PATHOLOGY RESULTING FROM COMBINED EXPOSURE TO HOT WEATHER AND HUMID ENVIRONMENTAL CONDITIONS (LITERATURE REVIEW)

V.A. Malchevskiy, M.M. Murtuzaliev, S.P. Sakharov, A.V. Malchevskiy

Abstract

Background. Global climate warming leads to the emergence of long periods of hot weather in summer in the Russian Federation. It causes the emergence of pathologies that were previously found only in tropical countries. One of them is foot pathology resulting from the combined effects of hot weather and humid environmental conditions. It can occur in people of various specialities working in humid environmental conditions. Analysing literature sources, we found that there is a lack of information on this problem in domestic literature sources.

Purpose. To increase the effectiveness of prevention, diagnosis and treatment of foot pathology arising in patients as a result of the combined effects of hot weather and humid environmental conditions, by informing medical professionals about this problem and ways of solving it.

Materials and methods. We searched for publications in RSCI, PubMed, Cochrane and Scopus databases by the key word term «tropical foot». A total of 29 publications were identified, of which 24 were selected.

Results. The information has been analysed and a modern view on the pathogenesis, diagnosis, treatment and prevention of «warm water immersion foot» (WWIF) and «tropical immersion foot» (TIF) has been formulated. It is revealed that the pathophysiology of these diseases is not sufficiently studied. It is noted that existing prevention and treatment measures are based on clinical experience rather than on the principles of evidence-based medicine.

Conclusion. In connection with global climate warming, the need for further scientific research aimed at a comprehensive integrated study of this pathology and the development on their basis of its effective prevention and treatment is certainly relevant.

Keywords: warm water immersion foot; WWIF; tropical immersion foot; TIF; review

For citation. Malchevskiy, V. A., Murtuzaliev, M. M., Sakharov, S. P., & Malchevskiy, A. V. (2025). Prevention, diagnosis and treatment of foot pathology resulting from combined exposure to hot weather and humid environmental conditions (literature review). *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(4), 659-672. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-4-1217

Введение

Вследствие глобального потепления длительная жаркая погода в летний период становится обычным явлением в районах планеты, где прежде был умеренный климат. Это явление обуславливает появление в странах с умеренным климатом патологии, которая ранее обычно встречалась практически только в тропических странах. К ней относится и патология стопы, возникающая в результате сочетанного воздействия жаркой погоды и влажных условий внешней среды. К группе риска можно отнести довольно широкий круг сугубо мирных профессий, таких как работники автомоек, моряки, рыбаки и т. д [21; 24]. В дельте реки Днепр в 2023 и 2024 годах в летний период стоит длительная жаркая погода в сочетании с влажными условиями внешней среды, что может приводить к появлению такой патологии у военнослужащих. Немало наших сограждан работают в зарубежных станах с тропическим климатом или приезжают заниматься в них экстремальным туризмом. Поэтому актуальность проблемы профилактики, диагностики и лечения патологии стопы, возникающей в результате сочетанного воздействия жаркой погоды и влажных условий внешней среды безусловна.

Проведя тщательный поиск во всех международных системах индексации специальных литературных источников, мы обнаружили только 24

публикации, касающиеся данной проблемы с момента первого медицинского её описания и все они являются зарубежными. Причем информация в них о ней изложена весьма фрагментарно, а полнотекстовой доступ к ним с территории РФ затруднен.

Все это в итоге приводит к острому дефициту информации по данной проблеме у отечественных медицинских специалистов и, как следствию, ухудшению результатов профилактики, диагностики, а также лечения пациентов с патологией стопы, возникающей в результате сочетанного воздействия жаркой погоды и влажных условий внешней среды. На восполнение этого дефицита информации и направлена данная статья.

Цель исследования – повысить эффективность профилактики, диагностики и лечения патологии стопы, возникающей у пациентов в результате сочетанного воздействия жаркой погоды и влажных условий внешней среды, путем информирования о данной проблеме и путях ее решения медицинских специалистов.

Источники данных. Выполнен поиск публикаций в базах данных РИНЦ, PubMed, Cochrane и Scopus по ключевому слову «тропическая стопа» без временных ограничений. Выявлено всего 29 публикаций, из которых отобрано 24. Критерием отбора было наличие возможности получения доступа к тексту публикации. Отечественных публикаций по данной теме выявлено не было.

Анализ результатов исследования

История вопроса, терминология и классификация

Медицинских описаний патологии стопы, возникающей в результате сочетанного воздействия жаркой погоды и влажных условий внешней среды, несмотря на множество военных операций проведенных в 19 и первой четверти 20 века в Индокитае, Индии, тропических зонах Латинской Америки и Африки, в специальных литературных источниках того времени не выявлено. Хотя, на наш взгляд, среди военных и путешественников она должна была встречаться. Первое описание данной патологии под названием «рисовая стопа» основанное на опыте лечения в госпитале 167 военнослужащих было сделано американскими врачами в ходе боев за остров Лейта [18]. В дальнейшем до момента начала боевых действий американской армии во Вьетнаме в 60 – 70 годы 20 века работ посвященных данной проблеме не публиковалось. В ходе боевых действий в джунглях Индокитая врачи американской армии столкнулись с патологией стоп, возникающей в результате сочетанного воздействия жаркой погоды и влажных

условий внешней среды. На основе полученного в ходе военного конфликта в Индокитае клинического опыта американскими специалистами был опубликовано несколько печатных работ его обобщающих [1; 2; 4-6; 8; 14; 17-19]. После 70 годов 20 века в специальной литературе вышло немного работ посвященных данной проблеме [3; 7; 9-13; 15; 16; 20-24]. Полномасштабных исследований, в том числе экспериментальных, направленных на изучение патофизиологии данной патологии не проводилось.

Схожие с точки зрения патофизиологии с «незамерзающей холодовой травмой» (Nonfreezing cold injury, NFCI) патологические состояния стоп, вызванные воздействием теплой воды называют «стопа, погруженная в теплую воду» (Warm water immersion foot, WWIF) и «тропическая иммерсионная стопа» (Tropical immersion foot, TIF). Под термином WWIF понимают транзиторный синдром, впервые описанный у солдат во Вьетнаме, проявляющийся в виде болезненных, белых, морщинистых подошв стоп возникающих из-за погружения в теплую воду (примерно от 15 до 32 °C; от 59 до 90 °F) при жаркой погоде на срок от 24 до 72 часов [5]. Под термином TIF понимают транзиторный синдром, более тяжелый, чем WWIF, так же описанный впервые у солдат во Вьетнаме, проявляющийся неспособностью человека ходить из-за болезненных, опухших стоп вследствие погружения в теплую воду (от 22 до 32 °C; от 72 до 90 °F) при жаркой погоде в течение более 72 часов [4]. Классификаций патологических состояний стоп вызванных воздействием теплой воды при жаркой погоде на сегодняшний день не разработано.

Эпидемиология, факторы риска появления WWIF и TIF

Патология стоп, вследствие их погружения в теплую воду с температурой выше 15°C (59°F) в основном возникает в жарком климате, чаще всего в полевых условиях, когда более суток солдаты с мокрыми ногами не могут снять обувь и высушить ноги [6].

Факторы риска появления WWIF и TIF [4]:

1. Постоянное погружение стоп в воду с температурой выше 15°C (59°F) при жаркой погоде более суток без возможности высушить стопы или заменить мокрые носки и ботинки на сухие.
2. Наличие мозолей на стопах.
3. Наличие в анамнезе ранее WWIF и TIF.

Патофизиология WWIF и TIF

Патофизиология WWIF и TIF очень слабо изучена. Существует мнение, что возникновение патологии связано с длительной (не менее 24 часов) гипергидратацией теплой водой поверхностных слоев кожи стоп [7]. Счи-

тается, что она приводит в дальнейшем к нейроваскулярным нарушениям микроциркуляции в мягких тканях стоп и отекам [22]. Поражения нервов, по мнению специалистов, скорее всего, возникают вторично вследствие повреждения их микроциркуляторного русла или воздействия механических факторов при ходьбе больного [15; 23].

Клиническая картина WWIF и TIF

WWIF и TIF являются преходящими синдромами, вызванными длительным пребыванием в теплой воде при жаркой погоде. WWIF возникает в результате пребывания в воде с температурой от 15 до 32°C (59–90°F) от 24 до 72 часов [5]. При WWIF подошвенная поверхность стопы становится морщинистой, беловатого цвета, иногда с легкой припухлостью, поэтому WWIF еще называют – «рисовое поле» [1]. Пациенты отмечают болезненность и парестезии в области в области стоп [20]. Могут отмечаться эрозивные дефекты кожи стоп [10]. Поднятие тяжестей больным при WWIF усиливает боль и парестезии в стопах с покалыванием или ощущением «хождения по канату» [4].

TIF возникает в результате пребывания в воде с температурой от 22 до 32°C (72–90°F) в течение 72 часов и более. TIF более тяжелое патологическое состояние, чем WWIF [23]. Клиническая картина TIF проявляется симметричной ярко красной эритемой, лихорадкой, лимфааденопатией, выраженным отеком и жгучей болезненностью с парестезиями в области голеностопного сустава и подошвенной поверхности стоп [17; 19]. Болезненность и парестезии стоп усиливаются при ходьбе. Подошвенные поверхности гипергидратированы и сморщены [21]. Ярко красная эритема переходит в динамике диффузные пятнистые экхимозы с крошечными везикулами и мелкой пятнисто-папулезной сыпью. Отек нивелируется через 4-7 суток. При TIF часто отмечаются ссадины от мокрых носков и язвы в областях стоп или голеностопного сустава, где обувь оказывает давление на отекшие ткани. Язвы редко возникают на костных выступах, где мало тканей, которые могут опухнуть [10].

WWIF и TIF являются болезненными и изнурительными состояниями существенно снижающие «качество жизни» человека, хорошо поддаются лечению и регрессируют в динамике. Они не являются прогрессирующими патологическими состояниями. Самые тяжелые симптомы проявляются в первые несколько дней. После этого симптомы, вызванные WWIF и TIF, обычно в динамике нивелируются. Усиление через несколько дней клинических симптомов, не следует связывать с WWIF и TIF, а обычно это обусловлено присоединением инфекции кожи и мягких тканей стоп [4; 5; 23].

Диагностика WWIF и TIF

Диагностика WWIF и TIF проводится на основании данных анамнеза и клинического осмотра, существующие на сегодняшний день лабораторные и инструментальные технологии мало информативны. Критерии постановки диагноза WWIF и TIF [16; 17; 20]:

1. Пребывание в теплой воде с температурой от 15 до 32°C (59–90°F) в течение не менее 24 часов при жаркой погоде.
2. Наличие специфической клинической картины, если исключены другие причины.

Дифференциальная диагностика WWIF и TIF

Дифференциальная диагностика WWIF и TIF должна проводиться с NFCI, первичными бактериальными и грибковыми инфекциями стоп, а также локальными эрозиями от мокрых носков [1; 4; 10].

Дифференциальная диагностика с NFCI проводится во время сбора анамнеза, при выяснении приблизительной температуры воды действующей на пораженные стопы. NFCI возникает при воздействии на стопы воды с температурой ниже 15°C (59°F) [23].

Пролежни мягких тканей могут в ряде случаев возникнуть в связи с WWIF и TIF из-за отека внутри сдавливающей одежды и обуви, в отличие от NFCI, они болезненны [16].

Инфекции мягких тканей могут вызывать гиперемию и отек кожи с последующим некрозом, обычно односторонним и хорошо ограниченным [20]. При WWIF и TIF гиперемия и отек кожи носят симметричный и диффузный характер [4]. Инфекции редко поражают только дистальную часть конечности. WWIF и TIF, как и инфекции мягких тканей могут вызывать эритему и отек, иногда с лихорадкой и лимфаденопатией [16]. Бактериальные и грибковые инфекции могут возникать как осложнения WWIF и TIF, что необходимо учитывать при дифференциальной диагностике [23].

При TIF стоп могут возникать изъязвления в области отека на подошвенной поверхности стопы и в области голеностопного сустава. Эрозии от мокрых носков представляют собой поверхностные эрозии кожи, которые возникают только в областях, которые испытывают трение или давление, особенно под шнурками ботинок [10].

Общие принципы лечебных мероприятий при WWIF и TIF

WWIF и TIF могут у пациентов существенно снижать «качество жизни», за счет невропатий и гиперчувствительности, вызывать гнойно-воспалительные и грибковые заболевания кожи стоп [4; 12; 13; 20]. Лечение WWIF и TIF носит симптоматический характер, так как патогенетическое

отсутствует. Состав лечебных мероприятий зависит от этапа оказания медицинской помощи. В среднем общая продолжительность лечения составляет от 4 до 12 дней [16; 23].

Догоспитальный этап оказания медицинской помощи при WWIF и TIF

Первое, что необходимо сделать при подозрении на WWIF и TIF это предотвратить дальнейшее воздействие воды на конечности. Конечности при WWIF и TIF следует высушить и пассивно согреть при комнатной температуре, приподняв под углом 30 градусов [16; 18]. Для борьбы с болевым синдромом могут назначаться не наркотические анальгетики или НПВС в стандартных дозировках [3; 12; 13; 15; 23]. При наличии отеков на нижних конечностях пострадавшим должно быть запрещено самостоятельно передвигаться на ногах, корме тех случаев, когда это необходимо для их эвакуации. Пациенты, которые вынуждены ходить, должны по возможности с целью нивелирования механического травмирующего фактора носить толстые свободные носки из хлопчато-бумажной ткани и не тесную очень мягкую обувь [20].

Госпитальный этап оказания медицинской помощи при WWIF и TIF

При поступлении в госпиталь выполняется рентгенография пораженных конечностей с целью исключения переломов костных структур. При наличии нарушений целостности кожных покровов выполняются стандартные мероприятия по профилактике столбнячной инфекции [5; 17]. Больные госпитализируются на срок от 4 до 12 суток. Режим у пациентов строгий постельный с приподнятым положением пораженных конечностей под углом 30 градусов, с целью снижения болевого и отёчных синдромов. Пораженные сегменты конечностей должны быть оголены. Воздух в палате комнатной температуры, максимально сухой [16; 18].

Медикаментозное лечение:

1. Борьба с болевым синдромом назначаются не наркотические анальгетики или НПВС в стандартных дозировках, амитриптилин (50–100 мг 1 раз в день на ночь), в случае их не эффективности с целью купированния нейропатических болей применяется габапентин в стандартных дозировках [3; 12; 13; 15; 23].
2. Антибиотикотерапия. Наличие лихорадки и локальной лимфоаденопатии сопровождающих WWIF и TIF показанием для назначения антибиотикотерапии не является. С целью профилактики воспалительных осложнений антибиотикотерапия при WWIF и TIF не назначается. Показанием для назначения антибиотикотерапии у пациентов с WWIF и TIF является наличие вторичных инфекционных

осложнений в виде инфекции кожи и подкожной клетчатки, обычно вызываемой стафилококками и стрептококками или грибами. Входными воротами для обычно являются эрозии и изъявления кожных покровов [2; 10; 17; 20; 23].

Осложнения WWIF и TIF

Главным осложнением WWIF и TIF существенно снижающим «качество жизни» пострадавших являются умеренно выраженные нейропатические боли в пораженных сегментах конечностей постоянного характера. Медикаментозное лечение данного осложнения на сегодняшний день не разработано. Для снижения выраженности болей достаточно эффективно применяется рефлексотерапия [3; 15].

Не приятным довольно распространенным осложнением WWIF и TIF является выраженный гипергидроз стоп. Он может вызывать рецидивирующие паронихиальные инфекции, вызванные грибковой инфекции ногтей и кожи [10].

Профилактика возникновения WWIF и TIF

Меры по профилактике возникновения WWIF и TIF:

1. Медикаментозная профилактика появления WWIF и TIF отсутствует.
2. Регулярная ежедневная ротация людей находящихся в жарких и влажных условиях внешней среды является основой профилактики возникновения WWIF и TIF [16].
3. Держать стопы сухими не менее 1 суток после каждых 2 – 3 непрерывного пребывания в воде [4; 5; 19; 21].
4. Подготовка и обучение людей к работе в жарких и влажных условиях внешней среды может уменьшить стресс, снижая вероятность возникновения WWIF и TIF [16].
5. Назначение ответственного по проверке состояния дистальных сегментов нижних конечностей в подразделении (обычно стрелок-санитар) осуществляющего их визуальный осмотр не реже двух раз в сутки [16].
6. Непромокаемая, свободная одежда и обувь, которая сохраняет руки и ноги человека в тепле и сухости [11].
7. В жарких и влажных условиях внешней среды смена носок 2-3 раза в сутки. Использование только носков хлопчато-бумажной ткани [16].
8. Не использование сапог с пароизоляцией [11].
9. Дважды в день необходимо наносить силиконовую смазку на стопы [8].
10. Адекватное питание богатое животным белком и витаминами [16].

Заключение

В связи с тем, что патофизиология патологии стопы, возникающей в результате сочетанного воздействия жаркой погоды и влажных условий внешней среды, изучена слабо, ее патогенетически обоснованное лечение до сих пор не разработано. Существующие меры профилактики основаны на клиническом опыте, а не на принципах доказательной медицины. А также учитывая тот факт, что в связи с глобальным потеплением климата длительная жаркая погода в летний период времени на территории РФ не является последние годы редкостью, необходимость проведения дальнейших научных исследований, направленных комплексное всестороннее изучение данной патологии, безусловно актуально.

Информация о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация о спонсорстве. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Список литературы / References

1. Akers, W. A. (1974a). Paddy foot: A warm water immersion foot syndrome variant. Part I. The natural disease, epidemiology. *Military Medicine*, *139*(8), 605–612. https://doi.org/10.1093/milmed/139.8.605
2. Akers, W. A. (1974b). Paddy foot: A warm water immersion foot syndrome variant. Part II. Field experiments, correlation. *Military Medicine*, *139*(8), 613–618. https://doi.org/10.1093/milmed/139.8.613
3. Aldington, D. J., McQuay, H. J., & Moore, R. A. (2011). End-to-end military pain management. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, *366*(1562), 268–275. https://doi.org/10.1098/rstb.2010.0214
4. Allen, A. M., & Taplin, D. (1973). Tropical immersion foot. *The Lancet*, *302*(7839), 1185–1189. https://doi.org/10.1016/S0140-6736(73)92949-8
5. Buckels, L. J., Gill, K. A., Jr., & Anderson, G. T. (1967). Warm water immersion foot. *Research Report of the US Naval Medical Field Research Laboratory*, *17*(5), 1–8. Retrieved from https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/6044241
6. Catterall, M. D. (1975). Warm water immersion injuries of the feet — a review. *Journal of the Royal Naval Medical Service*, *61*(1), 22–26. Retrieved from https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/1100815
7. Dhandapani, N., Samuelsson, K., Sköld, M., Zohrevand, K., & German, G. K. (2020). Mechanical, compositional, and microstructural changes caused by human skin maceration. *Extreme Mechanics Letters*, *41*, Article 101017. https://doi.org/10.1016/j.eml.2020.101017

8. Douglas, J. S., Jr., & Eby, C. S. (1972). Silicone for immersion foot prophylaxis: Where and how much to use. *Military Medicine*, *137*(10), 386–387. Retrieved from https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/4627482
9. Humphrey, W., & Ellyson, R. (1997). Warm water immersion foot: Still a threat to the soldier. *Military Medicine*, *162*(9), 610–611. Retrieved from https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/9290296
10. James, W. D., Elston, D. M., Treat, J. R., Rosenbach, M. A., & Neuhaus, I. (2019). *Andrews' diseases of the skin: Clinical dermatology*. Elsevier Health Sciences.
11. McCormack, N., & Bitter, C. C. (2020). My feet are killing me: A hiker's journey. *Wilderness & Environmental Medicine*, *31*(2), 245–246. https://doi.org/10.1016/j.wem.2019.12.010
12. McGreevy, K., Bottros, M. M., & Raja, S. N. (2011). Preventing chronic pain following acute pain: Risk factors, preventive strategies, and their efficacy. *European Journal of Pain Supplements*, *5*(2), 365–372. https://doi.org/10.1016/j.eujps.2011.08.013
13. Morand, J. J. (2008). Foot health in the tropics. *Médecine Tropicale (Marseille)*, *68*(2), 111–118. Retrieved from https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/18630042
14. Rietschel, R. L., & Allen, A. M. (1976). Immersion foot: A method for studying the effects of prolonged water exposure on human skin. *Military Medicine*, *141*(11), 778–780. https://doi.org/10.1093/milmed/141.11.778
15. Schmidt, D., Germano, A. M. C., & Milani, T. L. (2018). Effects of water immersion on sensitivity and plantar skin properties. *Neuroscience Letters*, *686*, 41–46. https://doi.org/10.1016/j.neulet.2018.08.048
16. Schwartz, R. B. (2008). *Tactical emergency medicine*. Wolters Kluwer, Lippincott Williams & Wilkins.
17. Shee, J. C. (1974). Tropical immersion foot. *The Lancet*, *303*(7848), 135. https://doi.org/10.1016/S0140-6736(74)92365-4
18. Taplin, D., & Zaias, N. (1966). Tropical immersion foot syndrome. *Military Medicine*, *131*(9), 814–818. https://doi.org/10.1093/milmed/131.9.814
19. Taplin, D., Zaias, N., & Blank, H. (1967). The role of temperature in tropical immersion foot syndrome. *JAMA*, *202*(6), 546–549. https://doi.org/10.1001/jama.1967.03130190152032
20. Ungley, C. C., Channell, G. D., & Richards, R. L. (2003). The immersion foot syndrome. *Wilderness and Environmental Medicine*, *14*(2), 135–141. https://doi.org/10.1580/1080-6032(2003)014[0135:TIFS]2.0.CO;2
21. Wrenn, K. (1991). Immersion foot: A problem of the homeless in the 1990s. *Archives of Internal Medicine*, *151*(4), 785–788. https://doi.org/10.1001/archinte.151.4.785

22. Wu, K. S., Van Osdol, W. W., & Dauskardt, R. H. (2006). Mechanical properties of human stratum corneum: Effects of temperature, hydration, and chemical treatment. *Biomaterials*, *27*(5), 785–795. https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2005.06.019
23. Zafren, K., Hollis, S., Weiss, E. A., Danzl, D., Wilburn, J., Kimmel, N., Imray, C., Giesbrecht, G., & Tipton, M. (2023). Prevention and treatment of non-freezing cold injuries and warm water immersion tissue injuries: Supplement to Wilderness Medical Society clinical practice guidelines for the prevention and treatment of frostbite. *Wilderness & Environmental Medicine*, *34*(2), 172–181. https://doi.org/10.1016/j.wem.2023.02.006
24. Zani, M. L. C., Lazzarini, R., & Silva, J. S. (2017). Warm-water immersion feet among car wash workers. *Revista Brasileira de Medicina do Trabalho*, *15*(3), 217–221. https://doi.org/10.5327/Z1679443520170021

ВКЛАД АВТОРОВ

Мальчевский В.А.: разработка концепции научной работы, рецензирование черновика рукописи.
Муртузалиев М.М: анализ данных и методология.
Сахаров С.П.: редактирование черновика рукописи и написание обзора.
Мальчевский А.В.: сбор данных и написание черновика рукописи.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Vladimir A. Malchevskiy: conceptualising a research paper, reviewing a draft manuscript.
Murtuzali M. Murtuzaliev: data analysis and methodology.
Sergei. P. Sakharov: editing the draft manuscript and writing the review.
Aleksey V. Malchevskiy: data collection and writing a draft of the manuscript.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Мальчевский Владимир Алексеевич, д-р мед. наук, профессор РАН, профессор кафедры мобилизационной подготовки здравоохранения и медицины катастроф
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тюменский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации
ул. Одесская, 54, г. Тюмень, 625023, Российская Федерация
malchevski@mail.ru

Муртузалиев Муртузали Магомедович, д-р мед. наук, профессор, профессор кафедры биофизики, информатики и медицинской аппаратуры кафедры
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Дагестанский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации
пл. Ленина, 1, г. Махачкала, 367000, Республика Дагестан, Российская Федерация
optfef@yandex.ru

Сахаров Сергей Павлович, к. мед. наук, доцент, заведующий кафедрой мобилизационной подготовки здравоохранения и медицины катастроф
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тюменский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации
ул. Одесская, 54, г. Тюмень, 625023, Российская Федерация
sacharov09@mail.ru

Мальчевский Алексей Владимирович, студент
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тюменский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации
ул. Одесская, 54, г. Тюмень, 625023, Российская Федерация
malchevskiy_2018@mail.ru

DATA ABOUT THE AUTHORS

Vladimir A. Malchevskiy, Dr. Sc. (Medicine), Professor RAS, Professor of the Department of Mobilisation Training of Public Health and Disaster Medicine
Tyumen State Medical University
54, Odesskaya Str., Tyumen, 625023, Russian Federation
malchevski@mail.ru
SPIN-code: 2918-1807
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1308-2899
ResearcherID: G-9557-2015
Scopus Author ID: SC 57194276974

Murtuzali M. Murtuzaliev, Dr. Sc. (Medicine), Professor, Professor of the Department of Biophysics, Informatics and Medical Devices, Department of Biophysics, Informatics and Medical Devices
Dagestan State Medical University
1, pl. Lenina, Makhachkala, 367000, Dagestan, Russian Federation
opmfef@yandex.ru
SPIN-code: 2386-1860
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8744-6026
ResearcherID: LLL-3506-2024

Sergei. P. Sakharov, Cand. Sc. (Medicine), Associate Professor, Head of the Department of Mobilisation Preparation of Public Health and Disaster Medicine
Tyumen State Medical University
54, Odesskaya Str., Tyumen, 625023, Russian Federation
sacharov09@mail.ru
SPIN-code: 9850-0460
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1737-3906
Scopus Author ID: SC 55328409300

Aleksey V. Malchevskiy, student
Tyumen State Medical University
54, Odesskaya Str., Tyumen, 625023, Russian Federation
malchevskiy_2018@mail.ru
SPIN-code: 9569-3048
ORCID: https://orcid.org/0009-0005-2743-0697
ResearcherID: KPB-8145-2024

Поступила 07.11.2024 Received 07.11.2024
После рецензирования 29.12.2024 Revised 29.12.2024
Принята 23.01.2025 Accepted 23.01.2025

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-4-1241 **EDN: EOXPJO**
УДК 615.45

CC BY NC ND

Научные обзоры

ФАРМАКОТЕРАПИЯ ПЕРИИМПЛАНТИТОВ В СТОМАТОЛОГИЧЕСКОЙ ПРАКТИКЕ: ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

С.Л. Бакшеева, Н.В. Тарасова, О.Ф. Веселова, В.Г. Базыльников, М.В. Голощапова, Д.А. Треймут

Аннотация

Обоснование. В настоящее время дентальная имплантация является одним из наиболее рекомендованных методов лечения, направленных на устранение дефектов зубных рядов. Вместе с тем за последние 10 лет все чаще в публикациях появляется описание одного из самых распространенных осложнений, которое может привести к потере дентального имплантата, периимплантита. В отечественных и зарубежных научных медицинских источниках информации все чаще дискутируется вопрос о подходах ведения пациентов с периимплантитами. Однако, несмотря на внедрение новейших технологий, инструментов, материалов и фармакологических препаратов практикующий врач все чаще сталкивается с проблемой постимплантационного осложнения.

Цель. Провести анализ литературных данных по применению фармакологических препаратов в комплексной терапии постимплантационных периимплантитов.

Материалы и методы. Для изучения возможностей применения фармпрепаратов в комплексной терапии периимплантита был проведен анализ актуальной литературы по данной теме, в том числе научных статей, монографий и диссертаций, всего нами проанализировано 32 источника. В работе представили мнение российских и иностранных ученых по интересующей теме. Для анализа литературы использовались материалы ресурсов: PubMed, Google Scholar, Scopus, Web of Science и eLibrary.

Результаты. В данном обзоре представлены обобщенные результаты исследований применения фармпрепаратов в комплексной терапии периимплантитов. Наиболее зарекомендованные лекарственные препараты из следующих фармакологических групп: антисептики, антибактериальные препараты, ле-

карственные средства растительного происхождения. Из антисептиков лидер назначений – 0,005% раствор хлоргексидина, а из антибактериальных - комбинация амоксициллина 2,25 г/сут, и метронидазола 0,5 г/сут. Современные литературные данные предлагают использовать фармакотерапию при лечении периимплантита, как дополнение к основной терапии.

Заключение. Для достижения положительного результата в лечении периимплантита нужно подходить к применению терапии комплексно, а значит применять комбинации фармакологических препаратов и использовать дополнительные методики удаления микробных пленок с основания имплантата.

Ключевые слова: периимплантит; антисептики; антибактериальные препараты; дентальная имплантология; имплантаты; обзор

Для цитирования. Бакшеева, С. Л., Тарасова, Н. В., Веселова, О. Ф., Базыльников, В. Г., Голощапова, М. В., & Треймут, Д. А. (2025). Фармакотерапия периимплантитов в стоматологической практике: обзор литературы. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(4), 673-691. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-4-1241

Scientific Reviews

PHARMACOTHERAPY OF PERI-IMPLANTITIS IN DENTAL PRACTICE: A LITERATURE REVIEW

S.L. Baksheeva, N.V. Tarasova, O.F. Veselova, V.G. Bazylnikov, M.V. Goloshchapova, D.A. Treymut

Abstract

Background. Nowadays dental implantation is one of the most recommended methods of treatment which is aimed at eliminating defects of dentitions. However, over the past 10 years, more and more publications have described one of the most common complications that can lead to the loss of a dental implant, peri-implantitis. In domestic and foreign scientific medical sources of information, the issue of approaches to managing patients with peri-implantitis is increasingly being discussed. However, despite the introduction of the latest technologies, instruments, materials and pharmacological preparations, the medical practitioners increasingly face the problem of post-implantation complications.

Purpose. To analyze the literature data on the use of pharmacological drugs in the complex therapy of post-implantation peri-implantitis.

Materials and methods. To study the possibilities of using pharmaceuticals in the complex therapy of peri-implantitis, an analysis of current literature on the topic was conducted, including scientific articles, monographs and dissertations, in total 32 sources were analyzed. The work presents the opinion of Russian and foreign scientists on the topic of interest. For the analysis of literature, the following materials of the resources were used: PubMed, Google Scholar, Scopus, Web of Science, and eLibrary.

Results. This review presents the generalized results of studies on the use of pharmaceuticals in the complex therapy of peri-implantitis. The most recommended medicines of pharmacological groups are from the following antiseptics, antibacterial drugs, herbal medicinal products. Among antiseptics, the leader in prescriptions is 0.005% chlorhexidine solution, and among antibacterial agents, the combination of amoxicillin 2.25 g/day and metronidazole 0.5 g/day. Modern literary data suggest using pharmacotherapy in the treatment of peri-implantitis, as an addition to the main therapy.

Conclusion. To achieve positive results in treatment the peri-implantitis it is necessary to approach therapy comprehensively, which means: to apply combinations of pharmacological drugs, to use additional methods of removal of microbic films from the implant base.

Keywords: peri-implantit; antiseptic agents; antibacterial drugs; dental implantology; implants; review

For citation. Baksheeva, S. L., Tarasova, N. V., Veselova, O. F., Bazylnikov, V. G., Goloshchapova, M. V., & Treymut, D. A. (2025). Pharmacotherapy of peri-implantitis in dental practice: A literature review. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(4), 673-691. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-4-1241

Введение

В настоящее время имплантация поставила на новый уровень полное восстановление отсутствующих зубов, современные подходы в стоматологической практике расширяют возможности людей с адентией, восстанавливать функции челюстно-лицевого аппарата, используя дентальные имплантаты. Но следует учитывать то, что не всегда интеграция дентальных имплантатов с костной тканью проходят без осложнений: с увеличением количества пациентов, обращающихся к стоматологу-хирургу для установки имплантатов, увеличивается и количество пациентов, обращающихся с такой патологией, как периимплантит [1]. Периимплантит - К10.2. (МКБ-10) представляет собой патологию деструктивно-воспалительного характера, которая поражает костную ткань и слизистую оболочку поло-

сти рта [7]. В комплексной терапии периимплантитов используются лекарственные средства разных фармакологических групп: антисептические, антибактериальные, противовоспалительные лекарственные препараты. Своевременное рациональное лечение периимплантита дает возможность пациенту избежать, не только повторной операции, но и психологических проблем, что подчеркивает важность своевременной фармакологической терапии на приеме у врача-стоматолога. На Всемирном семинаре, где проходило обсуждение классификации заболеваний пародонта и периимплантита (New York, 2017), определены точные критерии: наличие BoP (bleeding on probing), PPD (periodontal probing depth) >6mm и наличие убыли костной ткани [12]. На 2024 год, в Российской Федерации нет общепринятых критериев диагностики периимплантита, и в настоящее время не опубликованы клинические рекомендации с протоколами ведения пациентов с диагнозом: «Периимплантит».

Цель исследования – провести анализ современных научных и методических изданий в Российской Федерации и за рубежом по применению фармакологических препаратов в комплексной терапии периимплантитов.

Материал и методы исследования

В ходе исследования были проанализированы научные публикации в отечественной и зарубежной специализированной литературе, использовались электронные ресурсы PubMed, Google Scholar, Scopus, Web of Science и Elibrary. Выборка состояла из научных работ, посвященных применению лекарственных препаратов в терапии периимплантитов. Ключевые слова для поиска были: peri-implantit, antiseptic agents, antibacterial drugs, dental implantology, implants. Включались только статьи, на английском и русском языках, которые содержали оригинальные результаты исследований или обзоры по теме применения фармтерапии при лечении периимплантитов в стоматологии. В итоге было отобрано 32 публикаций.

Результаты исследования

В современных публикациях, посвященных проблеме периимплантита, содержатся неоднозначные показатели о распространенности данной деструктивно-воспалительной патологии тканей челюстной кости. В исследованиях А.С. Седина (2021) отмечается до 56% случаев развития периимплантных воспалений [7], при том, что проявления воспаления часто проходят бессимптомно для пациентов и выявляются при клинико-рентгенологическом обследовании. В научных исследованиях профессор

Самусенков О.В. (2019) указывает, что исследования выявили развития патологии в 12-43% случаев; коллектив авторов под руководством Д.Ю Плюхина (2019) в статье «Экспериментальная модель периимплантита», говорят о частоте 14-30%; Д.А. Трунин с соавт. (2021) указывают, что распространенность периимплантита колеблется от 28% до 56% [5; 6; 8].

За рубежом, по данным Jia-Hui Fu, Hom-Lay Wang (2020) уровень распространенности периимплантитов в Европе - 43% и 22% в Южной и Северной Америке [17]. В то же время Mario Romandini (2023), в отчетах своего исследования, где участвовало 149 пациентов (267 имплантатов), описал появление осложнений после имплантации в виде периимплантита у 35 пациентов (53 имплантата), соответственно статистические данные: 23,5% среди пациентов и 19,9% среди имплантатов [28].

Единогласным считается мнение отечественных и зарубежных ученых о ведущей роли бактериальной инвазии в этиологии периимплантитов [7; 14]. Установлено, что полиинфекция в основном представлена следующими пародонтопатогенными микроорганизмами: Bacteroides forsythus (55,6% случаев), Porphyromonas gingivalis (50,0%), Fusobacterium nucleatum (44,4%), A. Actinomycetemcomitans (38,9%), Prevotella intermedia (38,9%) и другими. Кроме того, в большинстве случаев отмечена их ассоциация с грибами рода Candida spp. (44,4%), Enterobacter spp. (38,9%), Streptococcus intermedius (13,2%), Peptostreptococcus micros (13,2%) и Staphylococcus aureus (28,5%) [2; 4; 11].

В виду того, что периимплантит спровоцирован патогенными микроорганизмами, то и лечение заболевания должно включать в себя антимикробную терапию, а конечной целью терапии должно являться разрешение воспалительного процесса и сохранение периимплантных тканей. Для профилактики и последующего лечения периимплантита разработаны различные способы воздействия: системные (назначение антибактериальной химиотерапии) и местные - применение различных лекарственных форм антисептиков и антибиотиков, применение абразивной техники с использованием порошка, скалеров с углеродистыми наконечниками, лазера, фотодинамической терапии и других методов [2; 4; 11].

Многочисленные клинические исследования применения антибактериальных препаратов показывают, что наиболее часто используются: из группы пенициллины - амоксициллин [10; 19; 23; 30]; группы линкозамиды - линкомицин [15], клиндамицин [23]; группы тетрациклины - доксициклин [22; 26], тетрациклин [22], миноциклин [11]; группы макролиды - азитромицин [18]; группы нитроимидазолы - метронидазол [10; 19]; группы фторхинолоны –

ципрофлоксацин [3; 23]. Причем ряд авторов рекомендуют применение монотерапии с использованием доксициклина [16; 22; 26] или амоксициллина [23; 27]. Значимые результаты при использовании доксициклина в виде костного наполнителя D-PLEX500 (56мг в 10г лекарственной формы) получил N. Emanuel (2020). Через 12 месяцев показатель PPD (mm) в тестовой группе −2.45 ± 1.32, а в контрольной −1.04 ± 1.76, BoP (%): 45.2 в тестовой группе и 18.6 в контрольной, уровень кости (mm): −1.20 ± 1.25 в тестовой группе и 0.37 ± 1.04 и в контрольной группе [16]. При комбинации двух препаратов амоксициллина и метронидазола, наиболее частое сочетание, эффект ингибирования микроорганизмов S. sanguinis, Fusobacterium nucleatum и Porphyromonas gingivalis был выше, чем при монотерапии [10]. Подтверждая данные результаты, Thomas E Rams (2014) в исследовании in vitro, опубликовал, что только у 6,7% испытуемых выявили виды, устойчивые как к амоксициллину, так и к метронидазолу [27]. Heitz-Mayfield LJ (2012) при использовании курса в течение 12 дней амоксициллина (системно) 2,25 г/сут и метронидазола (системно) 0,5 г 3 раза в сутки, выявил уменьшение BoP и PPD. Через 12 месяцев 100% имплантатов имели стабильный уровень костной ткани [19].

Дьячкова Е. Ю. в своей работе при лечении периимплантита использовала 14% доксициклин (местно) и хлоргексидин 15 мл 0,2% два раза в день в течение 7 дней. После лечения показатель PPD (mm) снизился на 2,1 мм (среднее значение). Через 6 месяцев клиническая ситуация мягких тканей была стабильна, без признаков воспаления и резорбции костной ткани [15].

Также доксициклиновый порошок (местно) в комбинации с тетрациклиновый раствором (местно) использовал Fawad Javed (2013), в его работе операционные участки зажили без осложнений, через 12 месяцев после лечения отмечалась убыль костной ткани в пределах нормы (в среднем 1 мм), PPD (mm) в среднем 3,6 мм без кровотечения, дальнейших изменений не регистрировалось [22].

Lucas Alves Moura (2012) впервые использовал доксициклин в виде наносфер. Результатами его работы стало уменьшение кровоточивости и глубины при зондировании периимплантантного кармана. Также исчезли участки костной резорбции на рентгеновском снимке [26].

Комбинированная терапия дентального периимплантита, предусматривающая использование ципрофлоксацина или цефазолина кратковременными курсами с последующим назначением пробиотика биоспорина, иммунокорректора ронколейкина и остеотропного препарата Бивалос, позволила добиться стойкого (не менее 2 лет) клинико-лабораторного выздоровления у 93,5% больных; при традиционном лечении (монотерапия с

антибиотиком) - у 70,0% пациентов [3]. При использовании миноциклина в виде микросфер Bassetti M (2014), сообщил о значительном сокращении кровоточивости при зондировании, уменьшении глубины карманного зондирования, бактерий Porphyromonas gingivalis и Tannerella forsythia через 12 месяцев после лечения [11].

Исследование, в которых применяли в тестовой группе азитромицин, и контрольной плацебо, получили снижения уровня воспаления без статистически значимой разницы. Поэтому данный препарат не нашел широкого применения среди специалистов [17].

Павлова О.Н. с соавторами (2020) наблюдали при периимплантите развитие окислительного стресса в ротовой полости, что, вероятнее всего, является отражением системных метаболических изменений. Получили успешный результат при включении в лечение периимплантита димефосфона с комплексным применением препаратов бора, что способствовало восстановлению нарушенного окислительного гомеостаза в ротовой жидкости и эффективной терапии [4].

В исследованиях, в которых применялись антисептические препараты, ключевую роль играет хлоргексидин биглюконат 0,2% [13; 15; 20; 25], а в дополнение раствор ЭДТА в качестве хелатного агента. David Herrera (2023) в своём исследовании применял 0,12% хлоргексидин, после чего получил статистически значимое улучшение клинических параметров через 6 месяцев по сравнению с исходным уровнем лечения периимплантита [20]. В стоматологической практике наиболее эффективнее применение хлоргексидина в комплексе с механическим удалением микробной пленки, так же хлоргексидинсодержащие препараты используются в условиях затруднения использования механических методов удаления биопленки [29]. В современной практике врача-стоматолога используются пародонтальные чипы, которые способствуют пролонгированному высвобождению хлоргексидина. За счёт постоянной концентрации антисептика обеспечивается более длительный антисептический эффект. Данные чипы выпускаются в концентрации активного вещества от 0,02% до 0,2% [24].

Более успешным лечение периимплантита стало, по мнению некоторых исследователей, при включении в терапию местных инъекций 7% коллагена и 5% мази Солкосерила. Клиническое наблюдение показало, что через 6 месяцев воспалительные явления мягких тканей стабилизировались, резорбции костной ткани не наблюдалось [15].

Vincenzo Iorio-Siciliano (2024) опубликовал результаты исследования с применением спермидина и геля с содержанием хлорида кальция, в ре-

зультатах исследования через 3 месяца, наблюдалось - устранение заболевания в 70-85%, что рекомендует к применению [21].

Включение повидон-йода, в терапию периимплантита изучал S. Shreenidhi (2024). Было выделено 3 группы с разными концентрациями антисептика: 1 группа - 0,1%, 2 группа - 2% и 3 группа - 10%. В ходе исследования, препараты, содержащие 2% и 10% повидон-йода, показали значительное улучшение десневого индекса (Loe, silness, 1963) и модифицированного индекса кровоточивости (A.Mombelli, M.A. Vanoosten, N.P. Land, 1987), следовательно, они могут быть эффективным дополнением при лечении периимплантита [31]. Однако, Wade RG. (2021), клиническими изысканиями, выявил, что повидон-йод обладает менее выраженными антисептическими свойствами в сравнении с хлоргексидином [32].

На основании полученных результатов своего исследования С.С. Шодиев с соавторами (2019) доказали, что применение отвара аниса, который оказывает антибактериальное, противовоспалительное воздействие, ускоряет регенеративно-репаративные функции организма, а также влияет на образование зрелой костной структуры в области дефекта, повышает прочность фиксации имплантата. На 5 день лечения у пациентов с периимплантитом отмечалось значительное снижение, до нормальных показателей, числа лейкоцитов и эпителиальных клеток как в периимплантатной жидкости, так и в слюне. У пациентов полностью восстанавливалась цитологическая картина, которая характеризовалась увеличением зрелых форм эпителиальных клеток до 91%, что соответствует показателям у условно здоровых лиц [9].

Заключение

В ходе анализа научной и специализированной клинической литературы был сформирован ряд выводов:

1. Лечение периимплантита должно быть комплексным, и включать в себя как общее, так и местное лечение патологии.

2. Выбор метода лечения периимплантита зависит от конкретного случая, лечение необходимо подбирать строго индивидуально, учитывая все психофизические особенности данного пациента.

3. По данным научно-методической литературы в области стоматологии, по теме лечения периимплантита, самыми эффективными фармакологическими группами являются: антибактериальные препараты (общего и местного применения) и местные антисептические лекарственные средства.

4. Среди антибактериальных препаратов лучшие результаты в лечении периимплантита показало сочетание амоксициллина 2,25 г/сут и метронидазола 0,5 г. 3 раза в сутки, курсом в течение 12 дней [19]. Среди антисептических препаратов лидером по эффективности стал хлоргексидин в концентрации 0,2% в виде раствора [13; 15; 20; 25].

Информация о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация о спонсорстве. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Список литературы

1. Бугоркова, И. А., Семёнова, О. А., & Бугорков, И. В. (2021). Использование различных остеопластических материалов в лечении экспериментально полученного периимплантита. *Морфологический альманах имени В. Г. Ковешникова*, *19*(1), 26–31. EDN: https://elibrary.ru/IORMMO
2. Копецкий, И. С., Страндстрем, Е. Б., & Копецкая, А. И. (2019). Современные аспекты методов лечения периимплантитов. *Российский медицинский журнал*, *25*(5–6), 324–327. https://doi.org/10.18821/0869-2106-2019-25-5-6-324-327. EDN: https://elibrary.ru/YVGUSJ
3. Мащенко, И. С., Гударьян, А. А., & Ширинкин, С. В. (2015). Современные подходы к комплексной терапии дентального периимплантита. *J Clin Med Kaz*, (4(38)), 50–55. EDN: https://elibrary.ru/WXGMPL
4. Павлова, О. Н., Кизим, А. Н., Духнова, Е. С., Федотова, А. А., & Лобачева, А. Е. (2020). Активность свободнорадикальных процессов в ротовой жидкости больных периимплантитом. В *Наука, образование, общество: тенденции и перспективы развития: Сборник материалов Международной научно-практической конференции* (с. 13–16). Чебоксары. EDN: https://elibrary.ru/LFNEAY
5. Плюхин, Д. В., Асташина, Н. Б., Соснин, Д. Ю., & Мудрова, О. А. (2019). Экспериментальная модель периимплантита. *Патологическая физиология и экспериментальная терапия*, *63*(2), 153–158. https://doi.org/10.25557/0031-2991.2019.02.153-158. EDN: https://elibrary.ru/QULHMK
6. Самусенков, В. О., Ильясова, С. Т., Ипполитов, Е. В., Зекий, А. О., & Богатов, Е. А. (2019). Периоперационное и послеоперационное применение фотоактивируемой дезинфекции для профилактики периимплантита при внутрикостной дентальной имплантации. *Институт стоматологии*, (3(84)), 60–61. EDN: https://elibrary.ru/PPKOSU

7. Сединина, А. С. (2021). Методы диагностики периимплантита. *Аллея Науки*, (1(52)), 304–307. EDN: https://elibrary.ru/GKHMYH
8. Трунин, Д. А., Вырмаскин, С. И., & Афанасьев, В. В. (2021). Опыт применения лазеров для вестибулопластики в периимплантатной зоне. *Медико-фармацевтический журнал «Пульс»*, *23*(6), 87–92. https://doi.org/10.26787/nydha-2686-6838-2021-23-6-87-92. EDN: https://elibrary.ru/ZLMBAW
9. Шодиев, С. С., Исматов, Ф. А., Нарзиева, Д. Б., Тухтамишев, Н. О., & Ахмедов, Б. С. (2019). Эффективность применения отвара аниса при лечении периимплантитов. *Достижения науки и образования*, (11(52)), 99–103. EDN: https://elibrary.ru/ENDRVM
10. Astasov-Frauenhoffer, M., Braissant, O., Hauser-Gerspach, I., Weiger, R., Walter, C., Zitzmann, N. U., & Waltimo, T. (2014). Microcalorimetric determination of the effects of amoxicillin, metronidazole, and their combination on in vitro biofilm. *Journal of Periodontology*, *85*(2), 349–357. https://doi.org/10.1902/jop.2013.120733
11. Bassetti, M., Schär, D., Wicki, B., Eick, S., Ramseier, C. A., Arweiler, N. B., Sculean, A., & Salvi, G. E. (2014). Anti-infective therapy of peri-implantitis with adjunctive local drug delivery or photodynamic therapy: 12-month outcomes of a randomized controlled clinical trial. *Clinical Oral Implants Research*, *25*(3), 279–287. https://doi.org/10.1111/clr.12155
12. Berglundh, T., Armitage, G., Araujo, M. G., Avila-Ortiz, G., Blanco, J., Camargo, P. M., Chen, S., Cochran, D., Derks, J., Figuero, E., Hämmerle, C. H. F., Heitz-Mayfield, L. J. A., Huynh-Ba, G., Iacono, V., Koo, K. T., Lambert, F., McCauley, L., Quirynen, M., Renvert, S., Salvi, G. E., Schwarz, F., Tarnow, D., Tomasi, C., Wang, H. L., & Zitzmann, N. (2018). Peri-implant diseases and conditions: Consensus report of workgroup 4 of the 2017 World Workshop on the Classification of Periodontal and Peri-Implant Diseases and Conditions. *Journal of Clinical Periodontology*, *45*(Suppl. 20), S286–S291. https://doi.org/10.1111/jcpe.12957
13. de Waal, Y. C., Raghoebar, G. M., Meijer, H. J., Winkel, E. G., & van Winkelhoff, A. J. (2015). Implant decontamination with 2 % chlorhexidine during surgical peri-implantitis treatment: a randomized, double-blind, controlled trial. *Clinical Oral Implants Research*, *26*(9), 1015–1023. https://doi.org/10.1111/clr.12419
14. Dhir, S., Mahesh, L., Kurtzman, G. M., & Vandana, K. L. (2013). Peri-implant and periodontal tissues: a review of differences and similarities. *Compendium of Continuing Education in Dentistry*, *34*(7), e69–e75.

15. Diachkova, E., Corbella, S., Taschieri, S., & Tarasenko, S. (2020). Nonsurgical Treatment of Peri-Implantitis: Case Series. *Dentistry Journal*, *8*(3), 78. https://doi.org/10.3390/dj8030078. EDN: https://elibrary.ru/CDWJXU
16. Emanuel, N., Machtei, E. E., Reichart, M., & Shapira, L. (2020). D-PLEX500: a local biodegradable prolonged release doxycycline-formulated bone graft for the treatment for peri-implantitis. A randomized controlled clinical study. *Quintessence International*, *51*(7), 546–553. https://doi.org/10.3290/j.qi.a44629
17. Fu, J. H., & Wang, H. L. (2020). Breaking the wave of peri-implantitis. *Periodontology 2000*, *84*(1), 145–160. https://doi.org/10.1111/prd.12335. EDN: https://elibrary.ru/YUDFMQ
18. Gershenfeld, L., Kalos, A., Whittle, T., & Yeung, S. (2018). Randomized clinical trial of the effects of azithromycin use in the treatment of peri-implantitis. *Australian Dental Journal*, *63*(3), 374–381. https://doi.org/10.1111/adj.12614
19. Heitz-Mayfield, L. J. A., Salvi, G. E., Mombelli, A., Faddy, M., & Lang, N. P. (2012). Anti-infective surgical therapy of peri-implantitis: A 12-month prospective clinical study. *Clinical Oral Implants Research*, *23*(2), 205–210. https://doi.org/10.1111/j.1600-0501.2011.02276.x
20. Herrera, D., Berglundh, T., Schwarz, F., Chapple, I., Jepsen, S., Sculean, A., Kebschull, M., Papapanou, P. N., Tonetti, M. S., & Sanz, M. (2023). Prevention and treatment of peri-implant diseases — The EFP S3 level clinical practice guideline. *Journal of Clinical Periodontology*, *50*(S26), 4–76. https://doi.org/10.1111/jcpe.13823. EDN: https://elibrary.ru/TBNTNI
21. Iorio-Siciliano, V., Marasca, D., Mauriello, L., Vaia, E., Stratul, S. I., & Ramaglia, L. (2024). Treatment of peri-implant mucositis using spermidine and calcium chloride as local adjunctive delivery to non-surgical mechanical debridement: A double-blind randomized controlled clinical trial. *Clinical Oral Investigations*, *28*(10), 537. https://doi.org/10.1007/s00784-024-05924-8. EDN: https://elibrary.ru/VRPYSO
22. Javed, F., Alghamdi, A. S., Ahmed, A., Mikami, T., Ahmed, H. B., & Tenenbaum, H. C. (2013). Clinical efficacy of antibiotics in the treatment of peri-implantitis. *International Dental Journal*, *63*(4), 169–176. https://doi.org/10.1111/idj.12034
23. Leonhardt, A., Dahlén, G., & Renvert, S. (2003). Five-year clinical, microbiological, and radiological outcome following treatment of peri-implantitis in man. *Journal of Periodontology*, *74*(10), 1415–1422. https://doi.org/10.1902/jop.2003.74.10.1415
24. Machtei, E. E., Romanos, G., Kang, P., Travan, S., Schmidt, S., Papathanasiou, E., Tatarakis, N., Tandlich, M., Liberman, L. H., Horwitz, J., Bassir, S. H., My-

neni, S., Shiau, H. J., Shapira, L., Donos, N., Papas, A., Meyle, J., Giannobile, W. V., Papapanou, P. N., & Kim, D. M. (2021). Repeated delivery of chlorhexidine chips for the treatment of peri-implantitis: A multicenter, randomized, comparative clinical trial. *Journal of Periodontology*, *92*(1), 11–20. https://doi.org/10.1002/JPER.20-0353. EDN: https://elibrary.ru/NHOASK

25. Malik, N., Naik, D., & Uppoor, A. (2015). Levels of myeloperoxidase and alkaline phosphatase in peri-implant sulcus fluid in health and disease and after nonsurgical therapy. *Implant Dentistry*, *24*(4), 434–440. https://doi.org/10.1097/ID.0000000000000277
26. Moura, L. A., Oliveira Giorgetti Bossolan, A. P., de Rezende Duek, E. A., Sallum, E. A., Nociti, F. H., Jr., Casati, M. Z., & Sallum, A. W. (2012). Treatment of peri-implantitis using nonsurgical debridement with bioresorbable nanospheres for controlled release of doxycycline: Case report. *Compendium of Continuing Education in Dentistry*, *33*(10), E145–E149.
27. Rams, T. E., Degener, J. E., & van Winkelhoff, A. J. (2014). Antibiotic resistance in human peri-implantitis microbiota. *Clinical Oral Implants Research*, *25*(1), 82–90. https://doi.org/10.1111/clr.12160
28. Romandini, M., Bougas, K., Alibegovic, L., Hosseini, S., Carcuac, O., Berglundh, T., & Derks, J. (2023). Long-term outcomes and prognostic factors of surgical treatment of peri-implantitis — A retrospective study. *Clinical Oral Implants Research*, *35*(3), 321–329. https://doi.org/10.1111/clr.14228. EDN: https://elibrary.ru/DQVSKA
29. Sanz, M., Herrera, D., Kebschull, M., Chapple, I., Jepsen, S., Beglundh, T., Sculean, A., Tonetti, M. S., EFP Workshop Participants and Methodological Consultants. (2020). Treatment of stage I–III periodontitis — The EFP S3 level clinical practice guideline. *Journal of Clinical Periodontology*, *47*(suppl. 22), 4–60. https://doi.org/10.1111/jcpe.13290. EDN: https://elibrary.ru/FTWHMZ
30. Shibli, J. A., Ferrari, D. S., Siroma, R. S., Figueiredo, L. C., Faveri, M., & Feres, M. (2019). Microbiological and clinical effects of adjunctive systemic metronidazole and amoxicillin in the non-surgical treatment of peri-implantitis: 1-year follow-up. *Brazilian Oral Research*, *33*(suppl. 1), e080. https://doi.org/10.1590/1807-3107bor-2019.vol33.0080
31. Shreenidhi, S., & Rajasekar, A. (2024). Clinical efficacy of different concentrations of povidone iodine in the management of peri-implant mucositis. *Journal of Long-Term Effects of Medical Implants*, *34*(2), 79–83. https://doi.org/10.1615/JLongTermEffMedImplants.2023047348. EDN: https://elibrary.ru/PMWYMF
32. Wade, R. G., Burr, N. E., McCauley, G., Bourke, G., & Efthimiou, O. (2021). The comparative efficacy of chlorhexidine gluconate and povidone-iodine antiseptics for the prevention of infection in clean surgery: A systematic review

and network meta-analysis. *Annals of Surgery*, *274*(6), e481–e488. https://doi.org/10.1097/SLA.0000000000004076. EDN: https://elibrary.ru/WMLXFF

References

1. Bugorkova, I. A., Semenova, O. A., & Bugorkov, I. V. (2021). Use of various osteoplastic materials in treatment of experimentally induced peri-implantitis. *Morphological Almanac Named After V. G. Koveshnikov*, *19*(1), 26–31. EDN: https://elibrary.ru/IORMMO
2. Kopetskiy, I. S., Strandstrem, E. B., & Kopetskaya, A. I. (2019). Modern aspects of peri-implantitis treatment methods. *Russian Medical Journal*, *25*(5–6), 324–327. https://doi.org/10.18821/0869-2106-2019-25-5-6-324-327. EDN: https://elibrary.ru/YVGUSJ
3. Mashchenko, I. S., Gudaryan, A. A., & Shirinkin, S. V. (2015). Modern approaches to comprehensive therapy of dental peri-implantitis. *J Clin Med Kaz*, *(4(38))*, 50–55. EDN: https://elibrary.ru/WXGMPL
4. Pavlova, O. N., Kizim, A. N., Dukhnova, E. S., Fedotova, A. A., & Lobacheva, A. E. (2020). Activity of free radical processes in oral fluid of patients with peri-implantitis. In *Science, Education, Society: Trends and Perspectives of Development: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference* (pp. 13–16). Cheboksary. EDN: https://elibrary.ru/LFNEAY
5. Plyukhin, D. V., Astashina, N. B., Sosnin, D. Yu., & Mudrova, O. A. (2019). Experimental model of peri-implantitis. *Pathological Physiology and Experimental Therapy*, *63*(2), 153–158. https://doi.org/10.25557/0031-2991.2019.02.153-158. EDN: https://elibrary.ru/QULHMK
6. Samusenkov, V. O., Ilyasova, S. T., Ippolitov, E. V., Zekiy, A. O., & Bogatov, E. A. (2019). Perioperative and postoperative use of photoactivated disinfection for prevention of peri-implantitis in intraosseous dental implantation. *The Dental Institute*, *(3(84))*, 60–61. EDN: https://elibrary.ru/PPKOSU
7. Sedinina, A. S. (2021). Methods of peri-implantitis diagnosis. *Alley of Science*, *(1(52))*, 304–307. EDN: https://elibrary.ru/GKHMYH
8. Trunin, D. A., Vyrmaskin, S. I., & Afanasyev, V. V. (2021). Experience of laser use for vestibuloplasty in peri-implant zone. *Medical and Pharmaceutical Journal "Pulse"*, *23*(6), 87–92. https://doi.org/10.26787/nydha-2686-6838-2021-23-6-87-92. EDN: https://elibrary.ru/ZLMBAW
9. Shodiev, S. S., Ismatov, F. A., Narzieva, D. B., Tukhtamishev, N. O., & Akhmedov, B. S. (2019). Effectiveness of anise decoction in treatment of peri-implantitis. *Achievements of Science and Education*, *(11(52))*, 99–103. EDN: https://elibrary.ru/ENDRVM

10. Astasov-Frauenhoffer, M., Braissant, O., Hauser-Gerspach, I., Weiger, R., Walter, C., Zitzmann, N. U., & Waltimo, T. (2014). Microcalorimetric determination of the effects of amoxicillin, metronidazole, and their combination on in vitro biofilm. *Journal of Periodontology*, *85*(2), 349–357. https://doi.org/10.1902/jop.2013.120733
11. Bassetti, M., Schär, D., Wicki, B., Eick, S., Ramseier, C. A., Arweiler, N. B., Sculean, A., & Salvi, G. E. (2014). Anti-infective therapy of peri-implantitis with adjunctive local drug delivery or photodynamic therapy: 12-month outcomes of a randomized controlled clinical trial. *Clinical Oral Implants Research*, *25*(3), 279–287. https://doi.org/10.1111/clr.12155
12. Berglundh, T., Armitage, G., Araujo, M. G., Avila-Ortiz, G., Blanco, J., Camargo, P. M., Chen, S., Cochran, D., Derks, J., Figuero, E., Hämmerle, C. H. F., Heitz-Mayfield, L. J. A., Huynh-Ba, G., Iacono, V., Koo, K. T., Lambert, F., McCauley, L., Quirynen, M., Renvert, S., Salvi, G. E., Schwarz, F., Tarnow, D., Tomasi, C., Wang, H. L., & Zitzmann, N. (2018). Peri-implant diseases and conditions: Consensus report of workgroup 4 of the 2017 World Workshop on the Classification of Periodontal and Peri-Implant Diseases and Conditions. *Journal of Clinical Periodontology*, *45*(Suppl. 20), S286–S291. https://doi.org/10.1111/jcpe.12957
13. de Waal, Y. C., Raghoebar, G. M., Meijer, H. J., Winkel, E. G., & van Winkelhoff, A. J. (2015). Implant decontamination with 2 % chlorhexidine during surgical peri-implantitis treatment: a randomized, double-blind, controlled trial. *Clinical Oral Implants Research*, *26*(9), 1015–1023. https://doi.org/10.1111/clr.12419
14. Dhir, S., Mahesh, L., Kurtzman, G. M., & Vandana, K. L. (2013). Peri-implant and periodontal tissues: a review of differences and similarities. *Compendium of Continuing Education in Dentistry*, *34*(7), e69–e75.
15. Diachkova, E., Corbella, S., Taschieri, S., & Tarasenko, S. (2020). Nonsurgical Treatment of Peri-Implantitis: Case Series. *Dentistry Journal*, *8*(3), 78. https://doi.org/10.3390/dj8030078. EDN: https://elibrary.ru/CDWJXU
16. Emanuel, N., Machtei, E. E., Reichart, M., & Shapira, L. (2020). D-PLEX500: a local biodegradable prolonged release doxycycline-formulated bone graft for the treatment for peri-implantitis. A randomized controlled clinical study. *Quintessence International*, *51*(7), 546–553. https://doi.org/10.3290/j.qi.a44629
17. Fu, J. H., & Wang, H. L. (2020). Breaking the wave of peri-implantitis. *Periodontology 2000*, *84*(1), 145–160. https://doi.org/10.1111/prd.12335. EDN: https://elibrary.ru/YUDFMQ
18. Gershenfeld, L., Kalos, A., Whittle, T., & Yeung, S. (2018). Randomized clinical trial of the effects of azithromycin use in the treatment of peri-implantitis. *Australian Dental Journal*, *63*(3), 374–381. https://doi.org/10.1111/adj.12614
19. Heitz-Mayfield, L. J. A., Salvi, G. E., Mombelli, A., Faddy, M., & Lang, N. P. (2012). Anti-infective surgical therapy of peri-implantitis: A 12-month prospec-

tive clinical study. *Clinical Oral Implants Research*, *23*(2), 205–210. https://doi.org/10.1111/j.1600-0501.2011.02276.x

20. Herrera, D., Berglundh, T., Schwarz, F., Chapple, I., Jepsen, S., Sculean, A., Kebschull, M., Papapanou, P. N., Tonetti, M. S., & Sanz, M. (2023). Prevention and treatment of peri-implant diseases — The EFP S3 level clinical practice guideline. *Journal of Clinical Periodontology*, *50*(S26), 4–76. https://doi.org/10.1111/jcpe.13823. EDN: https://elibrary.ru/TBNTNI
21. Iorio-Siciliano, V., Marasca, D., Mauriello, L., Vaia, E., Stratul, S. I., & Ramaglia, L. (2024). Treatment of peri-implant mucositis using spermidine and calcium chloride as local adjunctive delivery to non-surgical mechanical debridement: A double-blind randomized controlled clinical trial. *Clinical Oral Investigations*, *28*(10), 537. https://doi.org/10.1007/s00784-024-05924-8. EDN: https://elibrary.ru/VRPYSO
22. Javed, F., Alghamdi, A. S., Ahmed, A., Mikami, T., Ahmed, H. B., & Tenenbaum, H. C. (2013). Clinical efficacy of antibiotics in the treatment of peri-implantitis. *International Dental Journal*, *63*(4), 169–176. https://doi.org/10.1111/idj.12034
23. Leonhardt, A., Dahlén, G., & Renvert, S. (2003). Five-year clinical, microbiological, and radiological outcome following treatment of peri-implantitis in man. *Journal of Periodontology*, *74*(10), 1415–1422. https://doi.org/10.1902/jop.2003.74.10.1415
24. Machtei, E. E., Romanos, G., Kang, P., Travan, S., Schmidt, S., Papathanasiou, E., Tatarakis, N., Tandlich, M., Liberman, L. H., Horwitz, J., Bassir, S. H., Myneni, S., Shiau, H. J., Shapira, L., Donos, N., Papas, A., Meyle, J., Giannobile, W. V., Papapanou, P. N., & Kim, D. M. (2021). Repeated delivery of chlorhexidine chips for the treatment of peri-implantitis: A multicenter, randomized, comparative clinical trial. *Journal of Periodontology*, *92*(1), 11–20. https://doi.org/10.1002/JPER.20-0353. EDN: https://elibrary.ru/NHOASK
25. Malik, N., Naik, D., & Uppoor, A. (2015). Levels of myeloperoxidase and alkaline phosphatase in peri-implant sulcus fluid in health and disease and after nonsurgical therapy. *Implant Dentistry*, *24*(4), 434–440. https://doi.org/10.1097/ID.0000000000000277
26. Moura, L. A., Oliveira Giorgetti Bossolan, A. P., de Rezende Duek, E. A., Sallum, E. A., Nociti, F. H., Jr., Casati, M. Z., & Sallum, A. W. (2012). Treatment of peri-implantitis using nonsurgical debridement with bioresorbable nanospheres for controlled release of doxycycline: Case report. *Compendium of Continuing Education in Dentistry*, *33*(10), E145–E149.
27. Rams, T. E., Degener, J. E., & van Winkelhoff, A. J. (2014). Antibiotic resistance in human peri-implantitis microbiota. *Clinical Oral Implants Research*, *25*(1), 82–90. https://doi.org/10.1111/clr.12160

28. Romandini, M., Bougas, K., Alibegovic, L., Hosseini, S., Carcuac, O., Berglundh, T., & Derks, J. (2023). Long-term outcomes and prognostic factors of surgical treatment of peri-implantitis — A retrospective study. *Clinical Oral Implants Research*, *35*(3), 321–329. https://doi.org/10.1111/clr.14228. EDN: https://elibrary.ru/DQVSKA
29. Sanz, M., Herrera, D., Kebschull, M., Chapple, I., Jepsen, S., Beglundh, T., Sculean, A., Tonetti, M. S., EFP Workshop Participants and Methodological Consultants. (2020). Treatment of stage I–III periodontitis — The EFP S3 level clinical practice guideline. *Journal of Clinical Periodontology*, *47*(suppl. 22), 4–60. https://doi.org/10.1111/jcpe.13290. EDN: https://elibrary.ru/FTWHMZ
30. Shibli, J. A., Ferrari, D. S., Siroma, R. S., Figueiredo, L. C., Faveri, M., & Feres, M. (2019). Microbiological and clinical effects of adjunctive systemic metronidazole and amoxicillin in the non-surgical treatment of peri-implantitis: 1-year follow-up. *Brazilian Oral Research*, *33*(suppl. 1), e080. https://doi.org/10.1590/1807-3107bor-2019.vol33.0080
31. Shreenidhi, S., & Rajasekar, A. (2024). Clinical efficacy of different concentrations of povidone iodine in the management of peri-implant mucositis. *Journal of Long-Term Effects of Medical Implants*, *34*(2), 79–83. https://doi.org/10.1615/JLongTermEffMedImplants.2023047348. EDN: https://elibrary.ru/PMWYMF
32. Wade, R. G., Burr, N. E., McCauley, G., Bourke, G., & Efthimiou, O. (2021). The comparative efficacy of chlorhexidine gluconate and povidone-iodine antiseptics for the prevention of infection in clean surgery: A systematic review and network meta-analysis. *Annals of Surgery*, *274*(6), e481–e488. https://doi.org/10.1097/SLA.0000000000004076. EDN: https://elibrary.ru/WMLXFF

ВКЛАД АВТОРОВ

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку статьи для публикации.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

The authors contributed equally to this article.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Бакшеева Светлана Лукинична, доктор медицинских наук, доцент, заведующий кафедрой терапевтической стоматологии
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Красноярский государственный медицинский университет имени профессора В.Ф. Войно-Ясенецкого» Минздрава России

ул. Партизана Железняка, 1, г. Красноярск, 660022, Российская Федерация
sbacsheeva@mail.ru

Тарасова Наталья Валентиновна, кандидат медицинских наук, доцент кафедры терапевтической стоматологии
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Красноярский государственный медицинский университет имени профессора В.Ф. Войно-Ясенецкого» Минздрава России
ул. Партизана Железняка, 1, г. Красноярск, 660022, Российская Федерация
tarasovastom1@mail.ru

Веселова Ольга Федоровна, кандидат медицинских наук, доцент, заведующий кафедрой фармакологии и клинической фармакологии с курсом ПО
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Красноярский государственный медицинский университет имени профессора В.Ф. Войно-Ясенецкого» Минздрава России
ул. Партизана Железняка, 1, г. Красноярск, 660022, Российская Федерация
veselovaof@mail.ru

Базыльников Владимир Глебович, студент
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Красноярский государственный медицинский университет имени профессора В.Ф. Войно-Ясенецкого» Минздрава России
ул. Партизана Железняка, 1, г. Красноярск, 660022, Российская Федерация
bazylnikovvladimir@gmail.com

Голощапова Мария Владимировна, студент
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Красноярский государственный медицинский университет имени профессора В.Ф. Войно-Ясенецкого» Минздрава России

ул. Партизана Железняка, 1, г. Красноярск, 660022, Российская Федерация
maria-goloshchapova@mail.ru

Треймут Данила Александрович, студент
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Красноярский государственный медицинский университет имени профессора В.Ф. Войно-Ясенецкого» Минздрава России
ул. Партизана Железняка, 1, г. Красноярск, 660022, Российская Федерация
dntreymut@mail.ru

DATA ABOUT THE AUTHORS

Svetlana L. Baksheeva, Doctor of Sciences in Medicine, Associate Professor, Head of the Department of Therapeutic Dentistry
Krasnoyarsk State Medical University named after prof. V.F. Voino-Yasenetsky
1, Partizana Zheleznyaka Str., Krasnoyarsk, 660022, Russian Federation
sbacsheeva@mail.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1097-0778
ResearcherID: AET-3493-2022
Scopus Author ID: 57225150756

Natalia V. Tarasova, Candidate of Sciences in Medicine, Associate Professor of the Department of Therapeutic Dentistry
Krasnoyarsk State Medical University named after prof. V.F. Voino-Yasenetsky
1, Partizana Zheleznyaka Str., Krasnoyarsk, 660022, Russian Federation
tarasovastom1@mail.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0405-5650
ResearcherID: AAN-7095-2020

Olga F. Veselova, Candidate of Sciences in Medicine, Associate Professor, Head of the Department of Pharmacology and Clinical Pharmacology
Krasnoyarsk State Medical University named after prof. V.F. Voino-Yasenetsky
1, Partizana Zheleznyaka Str., Krasnoyarsk, 660022, Russian Federation
veselovaof@mail.ru

ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6126-665X
ResearcherID: AAN-2507-2020

Vladimir G. Bazylnikov, student
Krasnoyarsk State Medical University named after prof. V.F. Voino-Yasenetsky
1, Partizana Zheleznyaka Str., Krasnoyarsk, 660022, Russian Federation
bazylnikovvladimir@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0009-0001-0738-089X
ResearcherID: LKO-4144-2024

Mariya V. Goloshchapova, student
Krasnoyarsk State Medical University named after prof. V.F. Voino-Yasenetsky
1, Partizana Zheleznyaka Str., Krasnoyarsk, 660022, Russian Federation
maria-goloshchapova@mail.ru
ORCID: https://orcid.org/0009-0007-5520-742X
ResearcherID: LNR-4569-2024

Danila A. Treymut, student
Krasnoyarsk State Medical University named after prof. V.F. Voino-Yasenetsky
1, Partizana Zheleznyaka Str., Krasnoyarsk, 660022, Russian Federation
dntreymut@mail.ru
ORCID: https://orcid.org/0009-0007-8513-7549
ResearcherID: LLK-2309-2024

Поступила 26.12.2024 Received 26.12.2024
После рецензирования 15.01.2025 Revised 15.01.2025
Принята 13.02.2025 Accepted 13.02.2025

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

Научно-практический рецензируемый журнал **Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture** издается с целью пропаганды фундаментальных и фундаментально-прикладных региональных достижений в области медицины, биологии, сельского хозяйства и смежных дисциплин на территории Российской Федерации и за рубежом.

Требования к оформлению статей

Объем рукописи	15-24 страницы формата А4, включая таблицы, иллюстрации, список литературы; для аспирантов и соискателей ученой степени кандидата наук – 7-10.
Поля	все поля – по 20 мм
Шрифт основного текста	Times New Roman
Размер шрифта основного текста	14 пт
Межстрочный интервал	полуторный
Отступ первой строки абзаца	1,25 см
Выравнивание текста	по ширине
Автоматическая расстановка переносов	включена
Нумерация страниц	не ведется
Формулы	в редакторе формул MS Equation 3.0
Рисунки	по тексту
Ссылки на формулу	(1)
Ссылки на литературу	[2, с.5], цитируемая литература приводится общим списком в конце статьи в порядке упоминания
	ЗАПРЕЩАЕТСЯ ИСПОЛЬЗОВАТЬ ССЫЛКИ-СНОСКИ ДЛЯ УКАЗАНИЯ ИСТОЧНИКОВ

Обязательная структура статьи

УДК

ЗАГЛАВИЕ (на русском языке)

Автор(ы): фамилия и инициалы (на русском языке)

Аннотация (на русском языке)
Ключевые слова: отделяются друг от друга точкой с запятой (на русском языке)

ЗАГЛАВИЕ (на английском языке)

Автор(ы): фамилия и инициалы (на английском языке)

Аннотация (на английском языке)
Ключевые слова: отделяются друг от друга точкой с запятой (на английском языке)

Текст статьи (на русском языке)

1. Введение.
2. Цель работы.
3. Материалы и методы исследования.
4. Результаты исследования и их обсуждение.
5. Заключение.
6. Информация о конфликте интересов.
7. Информация о спонсорстве.
8. Благодарности.

Список литературы
Библиографический список по ГОСТ Р 7.05-2008

References
Библиографическое описание согласно требованиям журнала

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Фамилия, имя, отчество полностью, должность, ученая степень, ученое звание

Полное название организации – место работы (учебы) в именительном падеже без составных частей названий организаций, полный юридический адрес организации в следующей последовательности: улица, дом, город, индекс, страна (на русском языке)

Электронный адрес

SPIN-код в SCIENCE INDEX:

DATA ABOUT THE AUTHORS

Фамилия, имя, отчество полностью, должность, ученая степень, ученое звание

Полное название организации – место работы (учебы) в именительном падеже без составных частей названий организаций, полный юридический адрес организации в следующей последовательности: дом, улица, город, индекс, страна (на английском языке)

Электронный адрес

AUTHOR GUIDELINES

Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture is a multi-field dedicated peer reviewed scientific journal designed to promote both fundamental and applied regional achievements in the field of medicine, biology, agriculture and related sciences on the territory of the Russian Federation and abroad.

Requirements for the articles to be published

Volume of the manuscript	15-24 pages A4 format, including tables, figures, references; for post-graduates pursuing degrees of candidate and doctor of sciences – 7–10.
Margins	all margins –20 mm each
Main text font	Times New Roman
Main text size	14 pt
Line spacing	1.5 interval
First line indent	1,25 cm
Text align	justify
Automatic hyphenation	turned on
Page numbering	turned off
Formulas	in formula processor MS Equation 3.0
Figures	in the text
References to a formula	(1)
References to the sources	[2, p.5], references are given in a single list at the end of the manuscript in the order in which they appear in the text
	DO NOT USE FOOTNOTES AS REFERENCES

Article structure requirements

TITLE (in English)

Author(s): surname and initials (in English)

Abstract (in English)
Keywords: separated with semicolon (in English)

Text of the article (in English)

1. Introduction.
2. Objective.
3. Materials and methods.
4. Results of the research and Discussion.
5. Conclusion.
6. Conflict of interest information.
7. Sponsorship information.
8. Acknowledgments.

References
References text type should be Chicago Manual of Style

DATA ABOUT THE AUTHORS
Surname, first name (and patronymic) in full, job title, academic degree, academic title

Full name of the organization – place of employment (or study) without compound parts of the organizations' names, full registered address of the organization in the following sequence: street, building, city, postcode, country

E-mail address

SPIN-code in SCIENCE INDEX:

СОДЕРЖАНИЕ

ФИЗИОЛОГИЯ ЧЕЛОВЕКА И ЖИВОТНЫХ

МОЛЕКУЛЯРНЫЙ ВОДОРОД В ТЕХНОЛОГИИ ИСКУССТВЕННОГО ОСЕМЕНЕНИЯ КОРОВ
М.Н. Иващенко, А.В. Дерюгина, А.И. Ерзутов, В.А. Петров, А.А. Белов 11

ФИЗИОЛОГИЯ И БИОХИМИЯ РАСТЕНИЙ

ВЛИЯНИЕ ИОНОВ ЦИНКА И МЕДИ НА МОРФОГЕНЕЗ *ROBINIA PSEUDOACACIA* L. В КУЛЬТУРЕ *IN VITRO*
О.О. Жолобова, Т.В. Терещенко 25

ВЛИЯНИЕ МИКРООРГАНИЗМОВ РОДА *BACILLUS* НА МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ И ФОТОСИНТЕТИЧЕСКИЙ АППАРАТ *ALLIUM CEPA*
А.А. Касторнов, С.А. Петров, А.М. Субботин 45

ЭКОЛОГИЯ, ПОЧВОВЕДЕНИЕ И ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БИОЧАРА ДЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССА КОМПОСТИРОВАНИЯ КУРИНОГО ПОМЕТА
Н.В. Данилова, Л.Р. Бикташева, П.А. Курынцева, П.Ю. Галицкая, С.Ю. Селивановская 64

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ИНДЕКСА ПРОХЛАДНОСТИ НОЧЕЙ (CI) НА ТЕРРИТОРИИ КРЫМСКОГО ПОЛУОСТРОВА
Е.А. Рыбалко, Н.В. Баранова, А.С. Ерхова 94

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ, ЗАСУХИ И ЗАКИСЛЕНИЯ ПОЧВЫ НА ЕЕ ИНДИКАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
Е.В. Товстик, А.С. Олькова 109

РОЛЬ АГРОЛЕСОМЕЛИОРАТИВНЫХ СИСТЕМ
В ФОРМИРОВАНИИ УРОЖАЙНОСТИ *TRITICUM AESTIVUM*
(РЕГИОНАЛЬНЫЙ УРОВЕНЬ)
А.М. Пугачёва 124

БИОХИМИЯ, ГЕНЕТИКА И МОЛЕКУЛЯРНАЯ БИОЛОГИЯ

ОСОБЕННОСТИ СВОБОДНО-РАДИКАЛЬНОГО СТАТУСА
ФОЛЛИКУЛЯРНОЙ ЖИДКОСТИ КОБЫЛ В ПРОЦЕССЕ
ФОЛЛИКУЛОГЕНЕЗА
В.В. Калашников, Л.Ф. Лебедева,
О.В. Баковецкая, А.А. Терехина, Е.В. Солодова,
Ю.В. Абаленихина, А.В. Щулькин 155

НОВЫЕ ТРЕХКОМПОНЕНТНЫЕ СУПРАМОЛЕКУЛЯРНЫЕ ФОРМЫ
ФЕНБЕНДАЗОЛА: ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРАВНИТЕЛЬНОЙ ОСТРОЙ
ТОКСИЧНОСТИ НА БЕЛЫХ МЫШАХ
О.В. Дёмкина, С.С. Халиков, М.С. Халиков,
М.М. Ильин, С.В. Карамушкина 182

МОНИТОРИНГ ГЕНЕТИЧЕСКОГО ПОЛИМОРФИЗМА
ДНК-МАРКЕРОВ ПРОДУКТИВНОСТИ МОЛОЧНОГО СКОТА
И.П. Иванова, Е.Н. Юрченко, Ю.А. Оконешникова 206

ПОЛИМОРФИЗМ МИКРОСАТЕЛИТНЫХ ЛОКУСОВ КРУПНОГО
РОГАТОГО СКОТА ЛИМУЗИНСКОЙ ПОРОДЫ, РАЗВОДИМОГО
В РЕСПУБЛИКЕ БАШКОРТОСТАН
Т.А. Седых, Д.И. Гареева, Н.Р. Субханкулов,
В.И. Косилов, Д.Н. Зорин, М.Ю. Гладких, М.И. Селионова 223

ЗЕМЛЕДЕЛИЕ И ЗАЩИТА РАСТЕНИЙ

MULTIANTAGONISTIC OF *STREPTOMYCES NARBONENSIS* STRAIN
PSM242 AND *TRICHODERMA* SP. BIOCIDE COMBINED IN ENRICH
MEDIA AGAINST *MELOIDOGYNE* SP. ROOT-KNOT NEMATODE
ON CHERRY TOMATO PLANTS
P. Suryaminarsih, S.R. Lestari 250

АГРОХИМИЯ И АГРОПОЧВОВЕДЕНИЕ

ВЛИЯНИЕ СПЕКТРА СВЕТА НА РОСТ *LACTUCA SATIVA* В КОНТРОЛИРУЕМЫХ УСЛОВИЯХ: НОВЫЕ ПОДХОДЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ДЛЯ ГИДРОПОННЫХ СИСТЕМ
С.В. Абрамова, Е.Н. Бояров, Н.Ф. Двойнова, О.В. Купцова 269

PURIFICATION AND APPLYING DI LINH BENTONITE, LAM DONG, VIETNAM IN IMPROVING THE PROPERTIES OF CORAL SAND SOIL IN SEMI-ARID AND SALINE ISLANDS
C.T. Nguyen, D.N. Vu, T.H.T. Vo, T.T.T. Dinh, T.H. Le, M.T. Vu, V.T. Do, V.T. Nguyen 296

САДОВОДСТВО И ЛЕСОВОДСТВО

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАЛОПАХОТНОПРИГОДНЫХ ЗЕМЕЛЬ ДЛЯ ЛАНДШАФТНОГО И ТЕРРАСНОГО САДОВОДСТВА НА СКЛОНАХ СТАВРОПОЛЬСКОГО КРАЯ
Ф.Ф. Аполохов, С.Ф. Андрусенко, И.С. Усов 322

STRUCTURAL AND FLORISTICS CHARACTERISTICS OF THREE TYPICAL SUCCESSIONAL STAGES OF THE TROPICAL EVERGREEN BROADLEAF FOREST IN KON CHU RANG NATURE RESERVE, GIA LAI PROVINCE, VIETNAM
T.T.T. Huong, N.D. Hoi, D.H. Cuong, N.T. Minh 341

МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СОВРЕМЕННОГО ЛЕСОПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ КАК ОСНОВА УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ
С.О. Медведев, А.К. Назарова 362

ВЛИЯНИЕ ОРГАНО-МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ НА ПОКАЗАТЕЛИ ПРОДУКТИВНОСТИ И КАЧЕСТВА ВИНОГРАДА СОРТА ИТАЛИЯ И КОРРЕЛЯЦИОННО-СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ИССЛЕДУЕМЫХ ФАКТОРОВ
В.А. Бойко, Д.Ю. Белаш, С.В. Левченко, А.В. Романов, А.С. Бричков, Л.А. Воронина, В.В. Жаркова 383

ЗДРАВООХРАНЕНИЕ И ПРОФИЛАКТИЧЕСКАЯ МЕДИЦИНА

STUDY THE IMPACT OF PURIFIED STAPHYLOXANTHIN EXTRACTED FROM STAPHYLOCOCCUS AUREUS ON CAL-51 CANCER CELL LINE
T.H. Hassan, H.A. Ali, M.M. Sharba 404

СИМУЛЯЦИОННОЕ ОБУЧЕНИЕ ВРАЧЕЙ И СТУДЕНТОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВИРТУАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ – ЭФФЕКТИВНЫЙ ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ МЕТАПРЕДМЕТНЫХ НАВЫКОВ И ПОИСКА АНТРОПОЦЕНТРИЧНЫХ ИНСАЙТОВ
И.А. Мизиев, А.В. Ахохова, Л.Д. Карданова, М.Х. Тлакадугова, М.В. Тлупова, А.Р. Бечелова, М.М. Тхабисимова, А.А. Медалиева, Н.М. Тхабисимова 417

ВЛИЯНИЕ МЕДИКАМЕНТОЗНОЙ ТЕРАПИИ И ПРИВЕРЖЕННОСТИ К НЕЙ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ АНТИАГРЕГАНТНОЙ ТЕРАПИИ У ПАЦИЕНТОВ ХРОНИЧЕСКОЙ ИШЕМИЧЕСКОЙ БОЛЕЗНЬЮ СЕРДЦА
О.В. Демьяненко, В.И. Вишневский, И.А. Снимщикова, М.О. Ревякина 447

ДИНАМИКА МАРКЕРОВ ВОСПАЛЕНИЯ В ТЕЧЕНИЕ ШЕСТИ МЕСЯЦЕВ У ПАЦИЕНТОВ С БРОНХИАЛЬНОЙ АСТМОЙ, ПЕРЕНЕСШИХ COVID-19
Т.Г. Лобова, Т.И. Виткина 468

НЕЙРОФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ КОРРЕЛЯТЫ ОБРАБОТКИ ЗНАЧИМОЙ СЛУХОВОЙ ИНФОРМАЦИИ У МОЛОДЫХ ЛЮДЕЙ С МИОПИЕЙ 17-19 ЛЕТ
Р.Н. Зеленцов, И.С. Кожевникова, Л.В. Поскотинова 482

ФАКТОРЫ РИСКА И СОСТОЯНИЕ ЗДОРОВЬЯ СОТРУДНИКОВ УГОЛОВНО-ИСПОЛНИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ: ПОДХОДЫ К ДОКЛИНИЧЕСКОМУ ИССЛЕДОВАНИЮ НА ОСНОВЕ САМООЦЕНКИ
П.А. Кисляков, Н.А. Цветкова 501

ОПЫТ РЕГИОНОВ

ВОПРОСЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ
ПРОИЗВОДСТВА ПРОДУКЦИИ РАСТЕНИЕВОДСТВА
В ЦИФРОВОМ СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ
В.А. Погонышев, В.Е.Ториков, Д.А. Погонышева, Я.С. Ковалев 524

ПАРАЗИТОФАУНА РЫБ ВОДОЕМОВ СЕВЕРО-ВОСТОКА
АРМЕНИИ
Р.Л. Оганесян, О.В.Щербаков, С.А. Акопян, Дж.А. Мкртчян, М.Я. Рухкян 543

НАУЧНЫЕ ОБЗОРЫ И СООБЩЕНИЯ

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЭКСТРАКТА ПОЛИСАХАРИДА
ЦВЕТКА КАЛЕНДУЛЫ В ПОСТСТРЕССОРНОМ ПЕРИОДЕ
Д.С. Ванина, Ю.Ю. Бяловский, И.А. Сычев, А.А. Буржинский, Р.К. Воронина 577

ФИЗИОТЕРАПИЯ ИНСОМНИЙ:
СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ (ОБЗОР)
О.Л. Кирюхин, Л.Е. Дерягина, С.В. Булатецкий, Е.П. Глушкова 611

ПРОФИЛАКТИКА, ДИАГНОСТИКА И ЛЕЧЕНИЕ ПАТОЛОГИИ
СТОПЫ, ВОЗНИКАЮЩЕЙ В РЕЗУЛЬТАТЕ СОЧЕТАННОГО
ВОЗДЕЙСТВИЯ ЖАРКОЙ ПОГОДЫ И ВЛАЖНЫХ УСЛОВИЙ
ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ (ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ)
В.А. Мальчевский, М.М. Муртузалиев, С.П. Сахаров, А.В. Мальчевский 659

ФАРМАКОТЕРАПИЯ ПЕРИИМПЛАНТИТОВ
В СТОМАТОЛОГИЧЕСКОЙ ПРАКТИКЕ:
ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ
С.Л. Бакшеева, Н.В. Тарасова, О.Ф. Веселова, В.Г. Базыльников, М.В. Голощапова, Д.А. Треймут 673

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ 692

CONTENTS

HUMAN AND ANIMAL PHYSIOLOGY

MOLECULAR HYDROGEN IN THE TECHNOLOGY OF ARTIFICIAL INSEMINATION OF COWS
M.N. Ivashchenko, A.V. Deryugina, A.I. Erzutov, V.A. Petrov, A.A. Belov 11

PLANT PHYSIOLOGY AND BIOCHEMISTRY

INFLUENCE OF ZINC AND COPPER ON THE *IN VITRO* MORPHOGENESIS OF *ROBINIA PSEUDOACACIA* L.
O.O. Zholobova, T.V. Tereshchenko 25

THE INFLUENCE OF BACTERIA OF THE GENUS *BACILLUS* ON THE MORPHOLOGICAL PARAMETERS AND PHOTOSYNTHETIC APPARATUS OF *ALLIUM CEPA*
A.A. Kastornov, S.A. Petrov, A.M. Subbotin 45

ECOLOGY, SOIL SCIENCE AND NATURE MANAGEMENT

USE OF BIOCHAR TO INTENSIFY THE COMPOSTING PROCESS OF CHICKEN MANURE
N.V. Danilova, L.R. Biktasheva, P.A. Kuryntseva, P.Yu. Galitskaya, S.Yu. Selivanovskaya 64

SPATIAL DISTRIBUTION OF THE COOL NIGHT INDEX (CI) ON THE TERRITORY OF THE CRIMEAN PENINSULA
E.A. Rybalko, N.V. Baranova, A.S. Erkhova 94

COMPARATIVE ASSESSMENT OF THE IMPACT OF POLLUTION, DROUGHT AND ACIDIFICATION OF THE SOIL ON ITS INDICATIVE CHARACTERISTICS
E.V. Tovstik, A.S. Olkova 109

THE ROLE OF AGROFORESTRY SYSTEMS IN THE PRODUCTION OF *TRITICUM AESTIVUM* (REGIONAL LEVEL)
A.M. Pugacheva 124

BIOCHEMISTRY, GENETICS AND MOLECULAR BIOLOGY

FEATURES OF THE FREE RADICAL STATUS OF THE FOLLICULAR FLUID OF MARES IN THE PROCESS OF FOLLICULOGENESIS
V.V. Kalashnikov, L.F. Lebedev, O.V. Bakovetskaya, A.A. Terekhina, E.V. Solodova, Yu.V. Abalenikhina, A.V. Shchulkin 155

NEW THREE-COMPONENT SUPRAMOLECULAR FORMS OF FENBENDAZOLE: DETERMINATION OF COMPARATIVE ACUTE TOXICITY IN WHITE MICE
O.V. Demkina, S.S. Khalikov, M.S. Khalikov, M.M. Ilyin, S.V. Karamushkina 182

MONITORING OF GENETIC POLYMORPHISM OF DNA MARKERS OF DAIRY CATTLE PRODUCTIVITY
I.P. Ivanova, E.N. Yurchenko, Yu.A. Okoneshnikova 206

POLYMORPHISM OF MICROSATELLITE LOCI OF CATTLE OF THE LIMOUSINE BREED BRED IN THE REPUBLIC OF BASHKORTOSTAN
T.A. Sedykh, D.I. Gareeva, N.R. Subkhangulov, V.I. Kosilov, D.N. Zorin, M.Yu. Gladkikh, M.I. Selionova 223

SOIL FERTILITY AND PLANT PROTECTION

MULTIANTAGONISTIC OF *STREPTOMYCES NARBONENSIS* STRAIN PSM242 AND *TRICHODERMA* SP. BIOCIDE COMBINED IN ENRICH MEDIA AGAINST *MELOIDOGYNE* SP. ROOT-KNOT NEMATODE ON CHERRY TOMATO PLANTS
P. Suryaminarsih, S.R. Lestari 250

AGROCHEMISTRY AND AGRICULTURAL SOIL SCIENCE

THE EFFECT OF THE LIGHT SPECTRUM ON THE GROWTH OF *LACTUCA SATIVA* UNDER CONTROLLED CONDITIONS: NEW APPROACHES AND PROSPECTS FOR HYDROPONIC SYSTEMS
S.V. Abramova, E.N. Boyarov, N.F. Dvoinova, O.V. Kuptsova 269

PURIFICATION AND APPLYING DI LINH BENTONITE, LAM DONG, VIETNAM IN IMPROVING THE PROPERTIES OF CORAL SAND SOIL IN SEMI-ARID AND SALINE ISLANDS
C.T. Nguyen, D.N. Vu, T.H.T. Vo, T.T.T. Dinh, T.H. Le, M.T. Vu, V.T. Do, V.T. Nguyen 296

HORTICULTURE AND FORESTRY

THE USE OF LOW-ARROW LANDS FOR LANDSCAPE AND TERRACE GARDENING ON THE SLOPES OF STAVROPOL REGION
F.F. Apolokhov, S.F. Andrusenko, I.S. Usov 322

STRUCTURAL AND FLORISTICS CHARACTERISTICS OF THREE TYPICAL SUCCESSIONAL STAGES OF THE TROPICAL EVERGREEN BROADLEAF FOREST IN KON CHU RANG NATURE RESERVE, GIA LAI PROVINCE, VIETNAM
T.T.T. Huong, N.D. Hoi, D.H. Cuong, N.T. Minh 341

THE MODEL OF FUNCTIONING OF A MODERN TIMBER INDUSTRY ENTERPRISE AS A BASIS FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT
S.O. Medvedev, A.K. Nazarova 362

THE INFLUENCE OF ORGANOMINERAL FERTILIZERS ON PRODUCTIVITY AND QUALITY INDICATORS OF ITALIA GRAPE VARIETY AND CORRELATION-STATISTICAL ANALYSIS OF THE STUDIED FACTORS
V.A. Boiko, D.Yu. Belash, S.V. Levchenko, A.V. Romanov, A.S. Brichkov, L.A. Voronina, V.V. Zharkova 383

PUBLIC HEALTH AND PREVENTIVE MEDICINE

STUDY THE IMPACT OF PURIFIED STAPHYLOXANTHIN EXTRACTED FROM STAPHYLOCOCCUS AUREUS ON CAL-51 CANCER CELL LINE
T.H. Hassan, H.A. Ali, M.M. Sharba 404

SIMULATION TRAINING FOR DOCTORS AND STUDENTS USING VIRTUAL TECHNOLOGIES IS AN EFFECTIVE TOOL FOR DEVELOPING META-SUBJECT SKILLS AND SEARCHING FOR ANTHROPOCENTRIC INSIGHTS
I.A. Miziev, A.V. Akhokhova, L.D. Kardanova, M.Kh. Tlakadugova, M.V. Tlupova, A.R. Bechelova, M.M. Tkhabisimova, A.A. Medalieva, N.M. Tkhabisimova 417

INFLUENCE OF DRUG THERAPY AND ADHERENCE TO IT ON THE EFFECTIVENESS OF ANTIPLATELET THERAPY IN PATIENTS WITH CHRONIC ISCHEMIC HEART DISEASE
O.V. Demyanenko, V.I. Vishnevsky, I.A. Snimshchikova, M.O. Revyakina 447

DYNAMICS OF INFLAMMATORY MARKERS OVER SIX MONTHS IN PATIENTS WITH ASTHMA WHO UNDERWENT COVID-19
T.G. Lobova. T.I. Vitkina 468

NEUROPHISIOLOGICAL CORRELATES OF PROCESSING SIGNIFICANT AUDITORY INFORMATION IN YOUNG PEOPLE WITH MYOPIA 17-19 YEARS OLD
R.N. Zelentsov, I.S. Kozhevnikova, L.V. Poskotinova 482

RISK FACTORS AND HEALTH STATUS OF CORRECTIONAL OFFICERS: SELF-ASSESSMENT APPROACHES TO PRECLINICAL RESEARCH
P.A. Kislyakov, N.A. Tsvetkova 501

EXPERIENCE OF REGIONS

ISSUES OF IMPROVING CROP PRODUCTION
IN DIGITAL AGRICULTURE
V.A. Pogonyshev, V.E. Torikov,
D.A. Pogonysheva, Ya.S. Kovalev 524

FAUNA OF FISH PARASITES IN WATER BODIES
OF THE NORTH-EAST OF ARMENIA
R.L. Hovhannisyan, O.V. Shcherbakov, S.H. Hakobyan,
J.A. Mkrtchyan, M.Ya. Rukhkyan 543

SCIENTIFIC REVIEWS AND REPORTS

PROSPECTS FOR THE USE OF CALENDULA FLOWER
POLYSACCHARIDE EXTRACT IN THE POST-STRESS PERIOD
D.S. Vanina, Yu.Yu. Byalovsky, I.A. Sychev,
A.A. Burzhinsky, R.K. Voronina 577

PHYSIOTHERAPY FOR INSOMNIAS:
MODERN VIEWS (REVIEW)
O.L. Kiryukhin, L.E. Deryagina,
S.V. Bulatetsky, E.P. Glushkova 611

PREVENTION, DIAGNOSIS AND TREATMENT
OF FOOT PATHOLOGY RESULTING FROM COMBINED
EXPOSURE TO HOT WEATHER AND HUMID ENVIRONMENTAL
CONDITIONS (LITERATURE REVIEW)
V.A. Malchevskiy, M.M. Murtuzaliev, S.P. Sakharov,
A.V. Malchevskiy 659

PHARMACOTHERAPY OF PERI-IMPLANTITIS
IN DENTAL PRACTICE: A LITERATURE REVIEW
S.L. Baksheeva, N.V. Tarasova, O.F. Veselova,
V.G. Bazylnikov, M.V. Goloshchapova,
D.A. Treymut 673

RULES FOR AUTHORS 692

Подписано в печать 31.10.2025. Дата выхода в свет 31.10.2025. Формат 60x84/16. Усл. печ. л. 50,44. Тираж 50 экз. Свободная цена. Заказ SJLSA174/025. Отпечатано с готового оригинал-макета в типографии «Издательство «Авторская Мастерская» (ИП Давгуненко А.А. ИНН 344210747590). Адрес типографии: ул. Проезд Добролюбова 3 стр. 2, г. Москва, 127254, Россия.