

DOI: 10.12731/2658-6649-2022-14-6-372-387

УДК 574.24+ 547.822.1



ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ НОВЫХ 6-R-3,5-ДИНИТРО-1,2,3,4-ТЕТРАГИДРОПИРИДИНОВ НА НАКОПЛЕНИЕ ФОТОСИНТЕТИЧЕСКИХ ПИГМЕНТОВ И АСКОРБИНОВОЙ КИСЛОТЫ В РАСТИТЕЛЬНЫХ ТКАНЯХ

*Е.В. Иванова, Н.Н. Жуков, И.И. Сурова, М.Б. Никишина,
Л.Г. Мухторов, Ю.М. Атрощенко*

Обоснование. Проблема поиска новых эффективных средств защиты растений остается актуальной задачей современной агрохимии. Известно, что производные тетрагидропиридина проявляют биологическую активность широкого спектра действия, показывая, в том числе и фунгицидную активность. Однако, соединения, обладающие потенциальной биологической активностью, могут проявлять и высокую токсичность по отношению к человеку, выращиваемой культуре и окружающей среде в целом, поэтому так необходимо изучать их экологическую безопасность. Содержание фотосинтетических пигментов и аскорбиновой кислоты являются одними из важнейших биохимических показателей реакции растений на стрессовые факторы внешней среды, поэтому определение их количества помогает оценить физиологическое состояние растений и проанализировать токсичность синтезированных соединений.

Цель. Исследовать влияние новых 6-R-3,5-динитро-1,2,3,4-тетрагидропиридинов на содержание фотосинтетических пигментов и аскорбиновой кислоты в растительных тканях с целью оценки безопасности их применения в качестве потенциальных средств защиты растений.

Материалы и методы. Исследуемые соединения были получены по разработанной ранее методике селективного восстановления 2-R-3,5-динитропиридинов. Семена пшеницы озимой сорта «Московская 39» проращивали в чашках Петри, используя растворы синтезированных веществ. В качестве контроля использовали семена, пророщенные в воде. На девятый день определяли содержание различных групп фотосинтетических пигментов (хлорофиллы а, b, каротиноиды) спектрофотометрическим методом, а также аскорбиновой кислоты в растительных тканях йодометрическим методом. Каждый опыт

проводили в трех биологических и трех аналитических повторностях. Статистическую обработку результатов эксперимента осуществляли с помощью программ MS Excel 2003 и SigmaStat 3.1. В таблицы вносили средние арифметические значения определяемых параметров и их стандартные ошибки ($P > 0,95$). Кроме того, анализируемые вещества были протестированы на токсичность при помощи программного обеспечения GUSAR Environmental Toxicity.

Результаты. Изучено действие новых производных тетрагидропиридина на накопление фотосинтетических пигментов и аскорбиновой кислоты в растительных тканях пшеницы озимой. Показано, что исследуемые соединения не оказывают значительного токсического влияния на растения.

Заключение. В результате исследования влияния новых 6-R-3,5-динитро-1,2,3,4-тетрагидропиридинов на содержание фотосинтетических пигментов и аскорбиновой кислоты, а также компьютерного прогнозирования *in silico* в GUSAR Environmental Toxicity, было выявлено, что в целом, изучаемые соединения являются относительно безопасными и, следовательно, перспективными для дальнейшего тестирования в качестве биологически активных препаратов для защиты растений.

Ключевые слова: экологическая безопасность; экотоксичность; фотосинтетические пигменты; аскорбиновая кислота; тетрагидропиридины; средства защиты растений

Для цитирования. Иванова Е.В., Жуков Н.Н., Сурова И.И., Никишина М.Б., Мухторов Л.Г., Атрощенко Ю.М. Изучение влияния новых 6-R-3,5-динитро-1,2,3,4-тетрагидропиридинов на накопление фотосинтетических пигментов и аскорбиновой кислоты в растительных тканях // Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture. 2022. Т. 14, №6. С. 372-387. DOI: 10.12731/2658-6649-2022-14-6-372-387

STUDY OF THE EFFECT OF NEW 6-R-3,5-DINITRO-1,2,3,4-TETRAHYDROPYRIDINES ON THE ACCUMULATION OF PHOTOSYNTHETIC PIGMENTS AND ASCORBIC ACID IN PLANT TISSUES

*E.V. Ivanova, N.N. Zhukov, I.I. Surova, M.B. Nikishina,
L.G. Mukhtorov, Yu.M. Atroshchenko*

Background. The problem of finding new effective plant protection products remains an urgent task of modern agrochemistry. It is known that tetrahydropyridine

derivatives exhibit a broad spectrum of biological activity, including fungicidal activity. However, compounds with potential biological activity can also be highly toxic to humans, cultivated crops, and the environment as a whole, so it is necessary to study their environmental safety. The content of photosynthetic pigments and ascorbic acid are one of the most important biochemical indicators of plant response to environmental stress factors, therefore, determining their amount helps to assess the physiological state of plants and analyze the toxicity of the synthesized compounds.

Purpose. To study the effect of new 6-R-3,5-dinitro-1,2,3,4-tetrahydropyridines on the content of photosynthetic pigments and ascorbic acid in plant tissues in order to assess the safety of their use as potential plant protection products.

Materials and methods. The test compounds were obtained by the previously developed method for the selective reduction of 2-R-3,5-dinitropyridines. Winter wheat seeds of the Moskovskaya 39 variety were germinated in Petri dishes using solutions of the synthesized substances. Seeds germinated in water were used as controls. On the ninth day, the content of various groups of photosynthetic pigments (chlorophylls a, b, carotenoids), as well as ascorbic acid in plant tissues was determined. All experiments were carried out in triplicate. In addition, the analytes were tested for toxicity using the GUSAR Environmental Toxicity software.

Results. The effect of new derivatives of tetrahydropyridine on the accumulation of photosynthetic pigments and ascorbic acid in plant tissues of winter wheat was studied. It was shown that the studied compounds do not have a significant toxic effect on plants.

Conclusion. As a result of studying the effect of new 6-R-3,5-dinitro-1,2,3,4-tetrahydropyridines on the content of photosynthetic pigments and ascorbic acid, as well as *in silico* computer prediction in GUSAR Environmental Toxicity, it was found that, in general, the studied compounds are relatively safe and, therefore, promising for further testing as biologically active plant protection products.

Keywords: environmental safety; ecotoxicity; photosynthetic pigments; ascorbic acid; tetrahydropyridines; plant protection products

For citation. Ivanova E.V., Zhukov N.N., Surova I.I., Nikishina M.B., Mukhtorov L.G., Atroshchenko Yu.M. Study of the effect of new 6-R-3,5-dinitro-1,2,3,4-tetrahydropyridine on the accumulation of photosynthetic pigments and ascorbic acid in plant tissues. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 2022, vol. 14, no. 6, pp. 372-387. DOI: 10.12731/2658-6649-2022-14-6-372-387

Введение

Поиск новых эффективных сельскохозяйственных препаратов для защиты растений остается одним из приоритетных направлений современ-

ной агрохимии. В связи с актуальностью данной проблемы в ТГПУ им. Л.Н. Толстого на кафедре химии начаты исследования по изучению биологической [2, 6, 15], фунгицидной [5, 9, 14, 17] активности новых органических соединений и коллоидных растворов переходных металлов, а также их влиянию на ростовые процессы и биохимические показатели растений.

Данная работа посвящена изучению влияния новых, полученных нами ранее 6-R-3,5-динитро-1,2,3,4-тетрагидропиридинов на содержание фотосинтетических пигментов и аскорбиновой кислоты в растительных тканях. В литературе имеются данные о том, что производные тетрагидропиридинов обладают широким спектром биологической активности, в том числе фунгицидной [7, 13, 11, 12], и представляют интерес в разработке новых химических средств защиты растений. Однако, одной из основных задач стоит разработка не только высокоэффективных, но и безопасных для человека, возделываемых культур и окружающей среды сельскохозяйственных препаратов. В связи с этим новые синтезированные соединения, обладающие потенциальной биологической активностью в обязательном порядке необходимо тестировать на различные виды экологической токсичности.

Содержание фотосинтетических пигментов и аскорбиновой кислоты являются одними из важнейших биохимических показателей реакции растений на стрессовые факторы внешней среды [16]. Известно, что оценка количества фотосинтетических пигментов, таких как хлорофиллы и каротиноиды помогает сделать вывод об адаптации растений к новым экологическим условиям [19]. Содержание данных пигментов в растительных тканях является видовым признаком, но зависит не только от особенностей жизнедеятельности организма, его генетической природы, но и от условия произрастания и воздействия различных стрессовых факторов, например, таких как применение химических средств защиты растений. Аскорбиновая кислота (АК) является уникальным, полифункциональным органическим веществом с выраженными восстановительными свойствами. Она представляет собой мощный антиоксидант и принимает активное участие в фотосинтезе и дыхании в растительной клетке [18]. В последнее время было выяснено, что водорастворимые антиоксиданты играют важную роль в приобретении устойчивости растительного организма к стрессовым факторам, а их содержание помогает оценить физиологическое состояние растений [19, 20].

Кроме того, анализируемые соединения с помощью программы GUSAR on-line были протестированы на токсичность по следующим параметрам: фактор биоаккумуляции, значение LD50 (средняя смертельная концентра-

ция для дафний и гольяна), а также IGC50 (концентрация полумаксимального ингибирования роста) для инфузории *Tetrahymena pyriformis*.

Цель работы

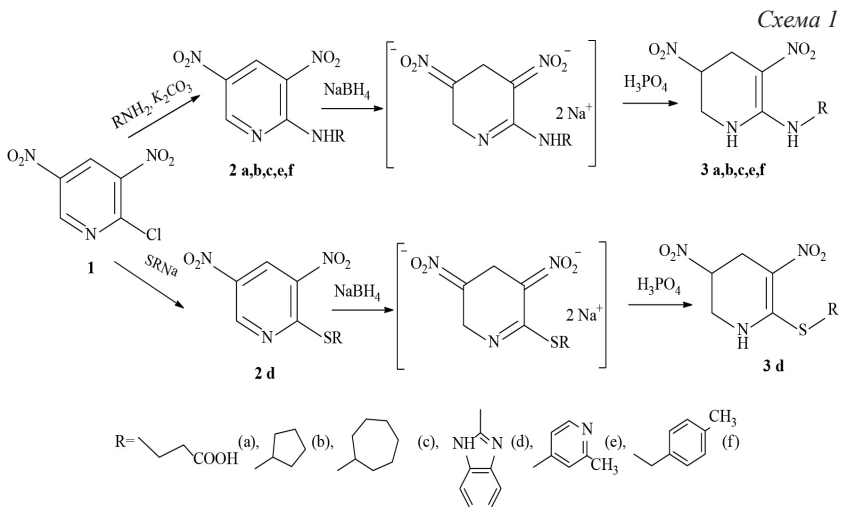
Исследовать влияние новых, полученных ранее 6-R-3,5-динитро-1,2,3,4-тетрагидропиридинов на содержание фотосинтетических пигментов и аскорбиновой кислоты в растительных тканях.

Научная новизна

Впервые изучено влияние новых синтезированных органических соединений – 6-R-3,5-динитро-1,2,3,4-тетрагидропиридинов на содержание хлорофиллов a, b, каротиноидов и витамина С в тканях растения пшеницы озимой.

Материалы и методы исследования

Выбранные для исследования новые производные 6-R-3,5-динитро-1,2,3,4-тетрагидропиридина **3 a-f** были получены нами ранее путем протонирования анионных гидридных аддуктов 2-R-3,5-динитропиридина раствором ортофосфорной кислоты [6] (схема 1). Исходные динитропиридины **2a-f**, в свою очередь, были получены замещением атома галогена в 2-хлор-3,5-динитропиридине соответствующими *N*- и *S*-нуклеофилами.



Структура полученных в результате синтеза соединений была подтверждена данными таких инструментальных методов анализа, как ИК, одномерная (^1H , ^{13}C) и двумерная корреляционная ЯМР-спектроскопия и масс-спектрометрия [8,10].

Семена пшеницы озимой сорта «Московская 39», используемые для проведения исследования, предоставлены сотрудниками Тульского НИИ-ИСХ Россельхозакадемии. Данные семена входят в Государственный реестр селекционных достижений с 2001 года.

Перед заложением опыта семена стерилизовали в 2,5%-ом растворе перманганата калия (KMnO_4). После семена в количестве 30 штук в один слой выкладывали на фильтровальную бумагу на чашку Петри. Проращивание осуществляли на питательной среде Кнопа с микроэлементами по Хогланду [1]. Рабочие растворы 6-R-3,5-динитро-1,2,3,4-тетрагидропиридинов готовили в концентрации $1 \cdot 10^{-4}$ моль/л. Контролем служили семена, пророщенные в воде.

Определение содержания различных групп фотосинтетических пигментов в растительных тканях.

Зеленую массу растения в количестве 100г тщательно растирали в ступке, после чего добавляли 15 мл этилового спирта (96%). Полученную смесь отфильтровывали и количественно переносили в мерную колбу на 25 мл, доводя объем раствора до метки 96% этанолом. Полученный экстракт фотометрировали в кварцевых кюветах, толщиной 1 см. Определение проводили при следующих значениях длин волн: 470 нм, 649 нм и 665 нм. Расчет содержания фотосинтетических пигментов вычисляли по формулам [4]:

$$\text{Хлорофилл а: } C = 13,95 * A_{665} - 6,88 * A_{649}$$

$$\text{Хлорофилл б: } C = 24,96 * A_{649} - 7,32 * A_{665}$$

$$\text{Каротиноиды: } C = \frac{1000 * A_{470} - 2,05 * A_{665} - 114,8 * A_{649}}{245}$$

Количество пигментов в мг/г сырой массы рассчитывали по формуле:

$$F = \frac{C * V}{1000 * m}$$

где F – масса пигмента в 1 г сырой массы листьев, мг/г; C – концентрация пигмента, мг/л; V – объем вытяжки, мл; m – масса навески листьев, мг.

Методика количественного определения аскорбиновой кислоты.

Иодометрическое определение аскорбиновой кислоты основано на определении количества йода, пошедшего на ее окисление в растительном сырье. При проведении расчетов учитывали, что 1 мл 0,1 н раствора I_2 в KI соответствует 0,0088 г кислоты аскорбиновой [3].

Проростки пшеницы измельчали, взвешивали 5 г и гомогенизировали в фарфоровой ступке с 10-15 мл 2%-ной хлороводородной кислоты. Далее смесь фильтровали в 50-ти мл мерную колбу и доводили соляной кислотой объем раствора до метки. Затем отбирали 10 мл полученного раствора, добавляли индикатор (1 мл 0,5%-ного раствора крахмала) и титровали 0,01 Н раствором I₂ в 1% KI до синей окраски, не исчезающей в течение 10 секунд.

Содержание аскорбиновой кислоты 1 г растительного сырья рассчитывали по формуле:

$$m = 0.88 * V,$$

где m – масса аскорбиновой кислоты в 1 г свежего растительного материала, г; V – объем 0,01 н раствора йода в 1% растворе йодида калия, пошедший на титрование, мл.

Результаты исследования и их обсуждение

Полученные в результате проведенных экспериментов данные по влиянию новых 6-R-3,5-динитро-1,2,3,4-тетрагидропиридинов представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Определение содержания групп фотосинтетических пигментов в растительных тканях пшеницы озимой

Вещество	Хлорофилл а	Хлорофилл б	Каротиноиды, С	Количество пигментов, F, мг/г
Контроль	1,655 ± 0,021	1,223 ± 0,012	0,402 ± 0,033	0,00012 ± 0,00005
3а	1,345 ± 0,059	1,787 ± 0,125	0,516 ± 0,023	0,0006775 ± 0,00002
3б	1,660 ± 0,074	4,418 ± 0,208	4,566 ± 0,214	0,0011415 ± 0,00001
3с	1,224 ± 0,022	1,623 ± 0,094	2,844 ± 0,187	0,000711 ± 0,00001
3д	1,174 ± 0,016	1,429 ± 0,081	2,544 ± 0,049	0,000636 ± 0,00004
3е	1,689 ± 0,038	1,562 ± 0,076	3,051 ± 0,112	0,00076275 ± 0,00007

Было установлено, что вещество 3б оказывает максимальное влияние на содержание исследуемых групп фотосинтетических пигментов. Так, содержание хлорофилла б, так же как и каротиноидов значительно превышает контрольный образец. Соединение 3д, напротив, способствует уменьшению количества указанных пигментов в зеленой массе астения. Уменьшение содержания хлорофилла а относительно контроля наблюдаются в растительных тканях пшеницы озимой при воздействии соединений 3а, 3с и 3д. При воздействии веществ 3б и 3е содержание хлорофилла

соответствует уровню контроля. Содержание хлорофилла b при действии всех веществ возрастает. Количество каротиноидов в разы больше, чем в контроле, наибольшее значение наблюдается под действием вещества 3b.

Известно, что высокий уровень загрязнения окружающей среды способствует снижению процессов накопления фотосинтетических пигментов, однако при воздействии изучаемых соединений на растения пшеницы озимой резкого снижения содержания пигментов не наблюдалось.

В ходе проведенных исследований показана неоднозначная реакция количественного изменения содержания групп фотосинтетических пигментов в листьях пшеницы. Повышение значений хлорофиллов можно объяснить образованием пигмента при индуцированном воздействии некоторых исследуемых веществ. Следует отметить, что содержание конститутивного пула уровня хлорофиллов может быть связано с включением фотосинтетического обмена в целостную физиолого-биохимическую структуру растения. Важность этого процесса доказывает последующее увеличение содержания пигментов в растениях.

Таким образом, выявлено, что на ранних этапах развития опытных растений наблюдается сложный характер синтеза и накопления разных групп фотосинтетических пигментов.

В таблице 2 представлены данные по влиянию новых 6-R-3,5-динитро-1,2,3,4-тетрагидропиридинов на содержание аскорбиновой кислоты

Таблица 2.

Содержание аскорбиновой кислоты в проростках пшеницы озимой

Вещество	Содержание аскорбиновой кислоты
3a	0,452± 0,019 на 17 % меньше
3b	0,610± 0,050 на 11% больше
3c	0,484± 0,049 на 12 % меньше
3d	0,442± 0,033 на 19% меньше
3e	0,628± 0,058 на 14% больше
Контроль	0,551 ± 0,040

Высокое содержание таких антиоксидантов, как аскорбиновая кислота является реакцией на окислительный стресс, который в свою очередь возникает при увеличении внутриклеточного образования активных форм кислорода под действием неблагоприятных факторов среды. Анализ полученных данных говорит о том, что лишь соединения 3b и 3e способствуют небольшому увеличению содержания АК в корнях пшеницы, относительно контроля.

Содержание АК в растениях нормируется многими в один момент идущими биохимическими и физиологическими процессами, и нормализация ее накопления требует координированной их работы. Это может быть не только при типичном функционировании растений, но и в стрессовых условиях, при которых часто наблюдается повышение биосинтеза и расщепления аскорбиновой кислоты в качестве вещества антиоксиданта.

Падение уровня аскорбиновой кислоты можно объяснить ее применением для активации защитных механизмов проростков и нейтрализацией отрицательных изменений в клетках растений.

Также синтезированные новые соединения **3 a-f** были протестированы на экологическую токсичность при помощи программы GUSAR Environmental Toxicity. В результате был выполнен прогноз по следующим параметрам: фактор биоаккумуляции (BCF), LD50 (среднее значение летальной дозы для дафний и гольяна), IGC50 (содержание вещества, при котором достигается полумаксимальное ингибирование роста) для инфузории *Tetrahymena pyriformis* (таблица 3).

Таблица 3.

**Результаты компьютерного прогнозирования
экоотоксичности 6-R-3,5-динитро-1,2,3,4-тетрагидропиридинов**

Соединение	Activity, Prediction Value			
	Bioaccumulation factor Log10(BCF)	Daphnia magna LC50-Log10(mol/L)	Fathead Minnow LC50 Log10(m-mol/L)	Tetrahymena pyriformis IGC50 -Log10(mol/L)
3a	0,019 outof AD	0,184 in AD	0,850 in AD	0,218 in AD
3b	-0,197 in AD	-0,875 in AD	0,257 in AD	-0,345 in AD
3c	0,126 in AD	-0,508 in AD	0,490 in AD	0,065 in AD
3d	0,101 outof AD	-0,516 in AD	-0,017 outof AD	-0,340 in AD
3e	0,125 in AD	-0,961 in AD	0,352 in AD	-0,430 in AD
3f	0,015 outof AD	-0,755 in AD	0,278 in AD	0,152 outof AD

in AD – вещество попадает в область применимости модели;

outof AD – вещество выходит за пределы области применимости модели

Как показывают данные таблицы, прогнозируемые значения фактора биоаккумуляции для синтезированных веществ находятся в интервале от -0,197 и до 0,126. Согласно рекомендациям приложения D Стокгольмской конвенции, анализируемый показатель для соединений, являющихся безопасными для окружающей среды не должен быть более 5. В связи с этим

можно сделать вывод об ожидаемой низкой экотоксичности анализируемых производных тетрагидропиридина.

Заключение

Таким образом, при изучении экологической токсичности новых 6-R-3,5-динитро-1,2,3,4-тетрагидропиридинов путем анализа содержания фотосинтетических пигментов и аскорбиновой кислоты в растительных тканях, а также с помощью методов компьютерного прогнозирования *insilico* GUSAR EnvironmentalToxicity, было выявлено, что в целом, изучаемые соединения являются относительно безопасными и, следовательно, перспективными для дальнейшего изучения в качестве биологически активных препаратов для защиты растений.

Список литературы

1. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). М.: Книга по Требованию. 2012. 352 с.
2. Завершнева Т.А., Никишина М.Б., Бойкова О.И., Иванова Е.В., Половецкая О.С., Атрощенко Ю.М., Кобраков К.И. Изучение влияния органических дикарбоновых кислот на биометрические показатели и накопление нитрат-ионов в плодах огурцов // Бутлеровские сообщения. 2017. Т. 51. № 9. С. 76-82.
3. Иванищев В.В., Евграфкина Т.Н., Бойкова О.И., Жуков Н.Н. Засоление почвы и его влияние на растения // Известия ТулГУ. Науки о Земле. 2020. Вып. 3. С. 28-42.
4. Иванищев В.В., Жуков Н.Н. Биохимия и молекулярная биология: учебно-методическое пособие для проведения лабораторно-практических занятий (учебно-методическое пособие). Тула: Изд-во ТулГУ. 2015. – 81 с.
5. Иванова Е.В., Никишина М.Б., Третьякова А.В., Мухторов Л.Г., Переломов Л.В., Атрощенко Ю.М. Изучение фунгицидной активности новых производных 7-R-1,5-динитро-3,7-диазабицикло[3.3.1]нонан-2-она // Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture. 2021. Т. 13. № 5. С. 307-320.
6. Мухторов Л.Г., Никишина М.Б., Иванова Е.В., Атрощенко Ю.М., Шахкельдян И.В., Пешкова А.М. Исследование биологической активности 2-метил-5-нитробензоксазола и его динитропроизводных // Бутлеровские сообщения. 2019. Т. 57. № 2. С. 85-89.
7. Солдатенков А. Т. и др. Синтез и биологическая активность N- и O-ацильных производных 2, 6-дифенил-4-гидроксипиридинов и тетрагидропиридинов // Химико-фармацевтический журнал. 2003. Т. 37. №. 10. С. 16-18.

8. Суrowa И. И., Ивановa Е.В., Атрощенко Ю.М., Кобраков К.И., Федянин И.В. Синтез новых производных 3,5-динитро-1,4,5,6-тетрагидропиридин-2-аминов // Бутлеровские сообщения. 2017. Т.49. №2. С.144-151.
9. Суrowa И.И., Ивановa Е.В., Атрощенко Ю.М., Песцов Г.В., Кобраков К.И. Синтез и фунгицидная активность 2-метокси-7-*R*-1,5-динитро-3,7-диазабицикло[3.3.1]нон-2-енов // Бутлеровские сообщения. 2017. Т.51. №8. С.65-70.
10. Суrowa И.И., Ивановa Е.В., Блохин И.В., Шахкельдян И.В., Атрощенко Ю.М., Кобраков К.И., Кузнецов Д.Н., Федянин И.В. Синтез 6-тиозамещенных 3,5-динитро-1,2,3,4-тетрагидропиридинов // Бутлеровские сообщения. 2015. Т.42. №4. С.91-95.
11. Akhaja T. N., Raval J. P. Design, synthesis, in vitro evaluation of tetrahydropyrimidine–isatin hybrids as potential antibacterial, antifungal and anti tubercular agents // Chinese Chemical Letters. 2012. Т. 23. №. 4. С. 446-449.
12. Basyouni W. M. et al. Silica sulfuric acid: an efficient, reusable, heterogeneous catalyst for the one-pot, five-component synthesis of highly functionalized piperidine derivatives // Synthetic Communications. 2015. Т. 45. №. 9. С. 1073-1081.
13. Dai L. et al. Synthesis and antifungal activity of natural product-based 6-alkyl-2, 3, 4, 5-tetrahydropyridines // Journal of natural products. 2011. Т. 74. №. 9. С. 2023-2026.
14. Kozlova V.N., Nikishina M.B., Ivanova E.V., Atroshchenko Yu. M. Fungicidal activity of colloidal copper particles obtained on the basis of the extract of the *Alchemilla Vulgaris* // Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture. 2020. Т. 12. № 1. С. 56-59.
15. Kozlova V.N., Nikishina M.B., Ivanova E.V., Atroshchenko Yu.M. The biological activity of colloidal copper particles obtained by “green synthesis” based on the extract of the *Alchemilla Vulgaris* // Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture. 2020. Т. 12. № 1. С. 60-63.
16. Kumari A., Sharma B., Singh B. N., Hidangmayum A., Jatav H.S., Chandra K., Singhal R. K., Sathyanarayana E., Patra A., Mohapatra K. K. Chapter 10 - Physiological mechanisms and adaptation strategies of plants under nutrient deficiency and toxicity conditions. Plant Perspectives to Global Climate Changes. Academic Press. 2022. P. 173-194.
17. Mukhtorov L., Pestsov G., Nikishina M., Ivanova E., Atroshchenko Yu., Perelomov L. Fungicidal properties of 2-amino-4-nitrophenol and its derivatives. // Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology. 2019. Т. 102. № 6. С. 880-886.
18. Njus D., Kelley P.M., Tu Y.-J., Schlegel H. B. Ascorbic acid: The chemistry underlying its antioxidant properties // Free Radical Biology and Medicine. 2020. V. 159. P.37-43.

19. Sherin G., Aswathi K.P. R., Puthur J.T. Photosynthetic functions in plants subjected to stresses are positively influenced by priming // *Plant Stress*. 2022. V. 4. 100079.
20. Smirnov N. Ascorbic acid metabolism and functions: A comparison of plants and mammals // *Free Radical Biology and Medicine*. 2018. V. 122. P. 116-129.

References

1. Dospikhov B. A. *Metodika polevogo opyta (s osnovami statisticheskoy obrabotki rezul'tatov issledovaniy)* [Field experiment methodology (with the basics of statistical processing of research results)]. M.: Kniga po Trebovaniyu, 2012, 352 p.
2. Zavershneva T.A., Nikishina M.B., Boykova O.I., Ivanova E.V., Polovetskaya O.S., Atroshchenko Yu.M., Kobrakov K.I. Izucheniye vliyaniya organicheskikh dikarbonovykh kislot na biometricheskiye pokazateli i nakopleniye nitrat-ionov v plodakh ogurtsov [Study of the influence of organic dicarboxylic acids on biometric parameters and the accumulation of nitrate ions in cucumber fruits]. *Butlerov Communications*, 2017, vol. 51, no. 9, pp. 76-82.
3. Ivanishchev V. V., Evgrashkina T.N., Boykova O.I., Zhukov N.N. Soil salinization and its influence the plants. *Izvestiya TulGU. Nauki o Zemle*, 2020, vol. 3, pp. 28-42.
4. Ivanishchev V.V., Zhukov N.N. *Biokhimiya i molekulyarnaya biologiya: uchebno-metodicheskoye posobiye dlya provedeniya laboratorno-prakticheskikh zanyatiy (uchebno-metodicheskoye)* [Biochemistry and molecular biology: teaching aid for laboratory and practical classes (teaching aid)]. Tula: Izd-vo TulGU, 2015, 81 p.
5. Ivanova E.V., Nikishina M.B., Mukhtorov L.G., Perelomov L.V., Atroshchenko Yu.M. Investigation of the fungicidal activity of new derivatives of 7-R-1,5-dinitro-3,7-diazabicyclo[3.3.1]nonan-2-one. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 2021, vol. 13, no. 5, pp. 307-320.
6. Mukhtorov L.G., Nikishina M.B., Ivanova E.V., Atroshchenko Yu.M., Shakhkeldyan I.V., Peshkova A.M. Issledovaniye biologicheskoy aktivnosti 2-metil-5-nitrobenzoksazola i yego dinitroproduktov [Study of the biological activity of 2-methyl-5-nitrobenzoxazole and its dinitro derivative]. *Butlerov Communications*, 2019, vol. 57, no. 2, pp. 85-89.
7. Soldatenkov, A.T., Levov, A.N., Mobio, I.G. et al. Synthesis and Biological Activity of N- and O-Acyl Derivatives of 2,6-Diphenyl-4-hydroxypiperidines and Tetrahydropyridines. *Pharmaceutical Chemistry Journal*, 2003, vol. 37, pp. 526–528.
8. Surova I.I., Ivanova E.V., Atroshchenko Yu.M., Kobrakov K.I., Fedyanin I.V. Sintez novykh proizvodnykh 3,5-dinitro-1,4,5,6-tetragidropiridin-2-ami-

- nov. [Synthesis of new derivatives of 3,5-dinitro-1,4,5,6-tetrahydropyridine-2-amines]. *Butlerov Communications*, 2017, vol. 49, no. 2, pp.144-151.
9. Surova I.I., Ivanova E.V., Atroshchenko Yu.M., Pestsov G.V., Kobrakov K.I. Sintez i fungitsidnaya aktivnost' 2-metoksi-7-R-1,5-dinitro-3,7-diazabitsiklo[3.3.1]non-2-yenov [Synthesis and fungicidal activity of 2-methoxy-7-R-1,5-dinitro-3,7-diazabicyclo[3.3.1]non-2-enes]. *Butlerov Communications*, 2017, vol. 51, no. 8, pp. 65-70.
 10. Surova I.I., Ivanova E.V., Blokhin I.V., Shakhkeldyan I.V., Atroshchenko Yu.M., Kobrakov K.I., Kuznetsov D.N., Fedyanin I.V. Sintez 6-tiozameshchennykh 3,5-dinitro-1,2,3,4-tetragidropiridinov [Synthesis of 6-thio-substituted 3,5-dinitro-1,2,3,4-tetrahydropyridines]. *Butlerov Communications*, 2015, vol. 42, no. 4, pp. 91-95.
 11. Akhaja T. N., Raval J. P. Design, synthesis, in vitro evaluation of tetrahydropyrimidine–isatin hybrids as potential antibacterial, antifungal and anti tubercular agents. *Chinese Chemical Letters*, 2012, vol. 23, no. 4, pp. 446-449.
 12. Basyouni W. M. et al. Silica sulfuric acid: an efficient, reusable, heterogeneous catalyst for the one-pot, five-component synthesis of highly functionalized piperidine derivatives. *Synthetic Communications*, 2015, vol. 45, no. 9, pp. 1073-1081.
 13. Dai L. et al. Synthesis and antifungal activity of natural product-based 6-alkyl-2, 3, 4, 5-tetrahydropyridines. *Journal of natural products*, 2011, vol. 74, no. 9, pp. 2023-2026.
 14. Kozlova V.N., Nikishina M.B., Ivanova E.V., Atroshchenko Yu.M. Fungicidal activity of colloidal copper particles obtained on the basis of the extract of the *Alchemilla Vulgaris*. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 2020, vol. 12, no. 1, pp. 56-59.
 15. Kozlova V.N., Nikishina M.B., Ivanova E.V., Atroshchenko Yu.M. The biological activity of colloidal copper particles obtained by “green synthesis” based on the extract of the *Alchemilla Vulgaris*. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 2020, vol. 12, no. 1, pp. 60-63.
 16. Kumari A., Sharma B., Singh B. N., Hidangmayum A., Jatav H.S., Chandra K., Singhal R. K., Sathyanarayana E., Patra A., Mohapatra K. K. Chapter 10 - Physiological mechanisms and adaptation strategies of plants under nutrient deficiency and toxicity conditions. *Plant Perspectives to Global Climate Changes*. Academic Press, 2022, pp. 173-194.
 17. Mukhtorov L., Pestsov G., Nikishina M., Ivanova E., Atroshchenko Yu., Pere-lomov L. Fungicidal properties of 2-amino-4-nitrophenol and its derivatives. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2019, vol. 102, no. 6, pp. 880-886.

18. Njus D., Kelley P.M., Tu Y.-J., Schlegel H. B. Ascorbic acid: The chemistry underlying its antioxidant properties. *Free Radical Biology and Medicine*, 2020, vol. 159, pp. 37-43.
19. Sherin G., Aswathi K.P. R., Puthur J.T. Photosynthetic functions in plants subjected to stresses are positively influenced by priming. *Plant Stress*, 2022, vol. 4, 100079.
20. Smirnoff N. Ascorbic acid metabolism and functions: A comparison of plants and mammals. *Free Radical Biology and Medicine*, 2018, vol. 122, pp. 116-129.

ВКЛАД АВТОРОВ

Иванова Е.В.: синтез и очистка исследуемых соединений, разработка концепции научной работы, составление черновика рукописи.

Жуков Н.Н.: подготовка к посеву семян пшеницы озимой, контроль за проростками, определение содержания пигментов и аскорбиновой кислоты.

Сурова И.И.: синтез и очистка исследуемых соединений, обработка и анализ результатов эксперимента.

Никишина М.Б.: анализ научной работы, критический пересмотр с внесением ценного интеллектуального содержания.

Мухторов Л.Г.: обработка и анализ результатов эксперимента.

Атрошенко Ю.М.: разработка концепции научной работы, редактирование черновика рукописи.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Evgeniya V. Ivanova: synthesis and purification of the studied compounds, development of the concept of scientific work, drafting of the manuscript.

Nikolay N. Zhukov: preparation for sowing seeds of winter wheat, control of seedlings, determination of the content of pigments and ascorbic acid.

Irina I. Surova: synthesis and purification of test compounds, processing and analysis of experimental results.

Maria B. Nikishina: analysis of scientific work, critical revision with the introduction of valuable intellectual content.

Loik G. Mukhtorov: processing and analysis of experimental results.

Yuri M. Atroshchenko: development of the concept of scientific work, editing the draft of the manuscript.

ДАнные ОБ АВТОРАХ

Иванова Евгения Владимировна, доцент кафедры химии, к.х.н., доцент
Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого

*пр. Ленина 125, г. Тула, 300026, Российская Федерация
otela005@gmail.com*

Жуков Николай Николаевич, доцент кафедры биологии и технологий живых систем, к.б.н., доцент
*Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого
пр. Ленина 125, г. Тула, 300026, Российская Федерация
z.nikolay87@mail.ru*

Сурова Ирина Игоревна, доцент кафедры химии, к.х.н.
*Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого
пр. Ленина 125, г. Тула, 300026, Российская Федерация
eledhwen_1@mail.ru*

Никишина Мария Борисовна, заведующий кафедрой химии, к.х.н., доцент
*Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого
пр. Ленина 125, г. Тула, 300026, Российская Федерация
тата-67@mail.ru*

Мухторов Лоик Гургович, научный сотрудник кафедры химии, к.х.н
*Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого
пр. Ленина 125, г. Тула, 300026, Российская Федерация
mukhtorov.loik@mail.ru*

Атрошенко Юрий Михайлович, ведущий научный сотрудник кафедры химии, д.х.н., профессор
*Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого
пр. Ленина 125, г. Тула, 300026, Российская Федерация
reaktiv@tsput.ru*

DATA ABOUT THE AUTHORS

Evgeniya V. Ivanova, Associate Professor of the Department of Chemistry, Ph.D., Associate Professor

*Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University
125, Lenina Ave., Tula, 300026, Russian Federation
omela005@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3398-6438>*

Nikolay N. Zhukov, Associate Professor of the Department of Biology and Technologies of Living Systems, Ph.D., Associate Professor
*Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University
125, Lenina Ave., Tula, 300026, Russian Federation
z.nikolay87@mail.ru*

Irina I. Surova, Associate Professor of the Department of Chemistry, Ph.D.
*Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University
125, Lenina Ave., Tula, 300026, Russian Federation
eledhwen_1@mail.ru*

Maria B. Nikishina, Head of the Department of Chemistry, Ph.D., Associate Professor
*Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University
125, Lenina Ave., Tula, 300026, Russian Federation
mama-67@mail.ru*

Loik G. Mukhtorov, Researcher of the Department of Chemistry, Ph.D.
*Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University
125, Lenina Ave., Tula, 300026, Russian Federation
mukhtorov.loik@mail.ru*

Yuri M. Atroshchenko, Leading Researcher of the Department of Chemistry, Doctor of Chemistry, Professor
*Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University
125, Lenina Ave., Tula, 300026, Russian Federation
reaktiv@tsput.ru*

Поступила 19.04.2022
После рецензирования 10.05.2022
Принята 20.05.2022

Received 19.04.2022
Revised 10.05.2022
Accepted 20.05.2022