

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-6-1-1350

EDN: MCGAOQ

УДК 631.41



Научная статья

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ И МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЧВЫ РЕСПУБЛИКИ ТАТАРСТАН ПРИ РАЗНЫХ ТИПАХ ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ

*Н.В. Данилова, В.Р. Бабичук, Л.Р. Бикташева, Р.В. Окунев,
П.А. Курынцева, С.Ю. Селивановская*

Аннотация

Обоснование. Качество почвы является ключевым фактором, определяющим ее способность поддерживать рост и развитие растений, сохранять экологическое равновесие и обеспечивать устойчивость агроэкосистем. Оно определяется совокупностью физико-химических и биологических свойств почвы, которые тесно взаимосвязаны и влияют на ее плодородие, структуру и экологические функции. Однако, характер землепользования может оказывать значительное влияние на данные свойства почвы, а, следовательно, на ее качество. Поэтому результаты этого исследования будут способствовать оптимальному и рациональному управлению почвенными экосистемами.

Цель. Исследованы участки серой лесной почвы (Haplic Luvisol) с разными типами землепользования на территории Лаишевского района Республики Татарстан. Оценено влияние разного типа землепользования (пашня, сенокосный луг, укос без изъятия фитомассы, залежь) на физико-химические (влажность, гранулометрический состав, содержание органического вещества, содержание нитратов) и микробиологические (респираторная активность, микробная биомасса, метаболическая активность) параметры серой лесной почвы.

Материалы и методы. Почвенные разрезы в количестве 4 штук были заложены на территории Лаишевского района Республики Татарстан на участках со следующими типами землепользования – пашня, сенокосный луг, укос без изъятия фитомассы и залежь. В почве определяли физико-химические

свойства – влажность согласно ГОСТ 5180-2015, гранулометрический состав с применением лазерного дифрактометра Microtrac Bluewave (Microtrac Retsch GmbH, Германия), содержание органического вещества согласно ГОСТ 27753.10-88, содержание нитратов согласно ГОСТ 26951-86. В качестве микробиологических характеристик почвы определяли респираторную активность согласно ISO 16072:2002 и микробную биомассу согласно ISO 14240-1:1997. Общую метаболическую активность микробного сообщества почвы определяли с помощью показателя AWCD (средняя окрашенность ячеек) и коммерческих плашек Biolog Ecoplates (Biolog Inc., США).

Результаты. Установлено, что для профиля почвы пашни характерно более однородное распределение содержания органического вещества, более высокое содержание нитратов (13%) и микробной биомассы (145,5 мг/кг). В почве под пашней выявлена гомогенизация верхнего слоя и связанное с этим более однородное распределение фракций песка и ила. В почвах естественных типов землепользования наблюдалась дифференциация гранулометрического состава по профилю, более высокая респираторная (до 0,76 мкг C-CO₂/г*ч) и метаболическая активность, а также аккумулятивное органического вещества.

Заключение. Проведённые исследования подтвердили значительное влияние типа землепользования на физико-химические и биологические свойства серой лесной почвы. Интенсивная сельскохозяйственная деятельность, в частности использование почвы под пашню, приводит к изменениям в ее профиле. Снижение антропогенного воздействия на почву способствует сохранению и улучшению почвенных свойств. Полученные результаты свидетельствуют о необходимости рационального управления почвенными ресурсами, направленного на минимизацию деградиционных процессов и поддержание экологических функций почв. Оптимизация землепользования с учётом выявленных закономерностей позволит обеспечить устойчивое плодородие почв и сохранение их биоразнообразия.

Ключевые слова: изменение землепользования; почвенные функции; органическое вещество почвы; респираторная активность; микробная биомасса; серые лесные почвы; Harpic Luvisols

Для цитирования. Данилова, Н. В., Бабичук, В. Р., Бикташева, Л. Р., Окунев, Р. В., Курынцева, П. А., & Селивановская, С. Ю. (2025). Физико-химические и микробиологические характеристики почвы Республики Татарстан при разных типах землепользования. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 17(6-1), 168-196. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-6-1-1350>

Original article

PHYSICOCHEMICAL AND MICROBIOLOGICAL CHARACTERISTICS OF SOILS IN THE REPUBLIC OF TATARSTAN UNDER DIFFERENT TYPES OF LAND USE

*N.V. Danilova, V.R. Babichuk, L.R. Biktasheva, R.V. Okunev,
P.A. Kuryntseva, S.Yu. Selivanovskaya*

Abstract

Background. Soil quality is a key factor determining its ability to support plant growth and development, maintain ecological balance and ensure the sustainability of agroecosystems. It is determined by a set of physicochemical and biological soil properties that are closely interrelated and affect its fertility, structure and ecological functions. However, the nature of land use can have a significant impact on these soil properties and, consequently, on its quality. Therefore, the results of this study will contribute to the optimal and rational management of soil ecosystems.

Purpose. The gray forest soil (Haplic Luvisol) plots with different types of land use in the Laishevsky district of the Republic of Tatarstan were studied. The influence of different types of land use (arable land, hay meadow, mowing without phytomass removal, fallow land) on the physicochemical (humidity, granulometric composition, organic matter content, nitrate content) and microbiological (respiratory activity, microbial biomass, metabolic activity) parameters of the gray forest soil was assessed.

Materials and methods. Four soil pits were laid in the Laishevsky District of the Republic of Tatarstan on sites with the following types of land use: arable land, hay meadow, mown without phytomass removal, and fallow land. The soil was analyzed for its physicochemical properties: moisture according to GOST 5180-2015, particle size distribution using a Microtrac Bluewave laser diffractometer (Microtrac Retsch GmbH, Germany), organic matter content according to GOST 27753.10-88, and nitrate content according to GOST 26951-86. The soil microbiological characteristics were analyzed: respiration activity according to ISO 16072:2002 and microbial biomass according to ISO 14240-1:1997. The total metabolic activity of the soil microbial community was determined using the AWCD (average cell color density) index and commercial Biolog Ecoplates (Biolog Inc., USA).

Results. It was found that the arable soil profile is characterized by a more uniform distribution of organic matter content, a higher content of nitrates (13%)

and microbial biomass (145.5 mg/kg). Homogenization of the upper layer and the associated more uniform distribution of sand and silt fractions were revealed in the soil under arable land. Differentiation of particle size distribution along the profile, higher respiration (up to 0.76 $\mu\text{g C-CO}_2/\text{g}\cdot\text{h}$) and metabolic activity, as well as accumulation of organic matter were observed in the soils of natural land use types.

Conclusion. The conducted studies confirmed the significant influence of the type of land use on the physicochemical and biological properties of gray forest soil. Intensive agricultural activity, in particular the use of soil for arable land, leads to changes in its profile. Reducing the anthropogenic impact on the soil helps to preserve and improve soil properties. The results obtained indicate the need for rational management of soil resources aimed at minimizing degradation processes and maintaining the ecological functions of soils. Optimization of land use taking into account the identified patterns will ensure sustainable soil fertility and the preservation of their biodiversity.

Keywords: land use change; soil functions; soil organic matter; respiratory activity; microbial biomass; grey forest soils; Haplic Luvisols

For citation. Danilova, N. V., Babichuk, V. R., Biktasheva, L. R., Okunev, R. V., Kuryntseva, P. A., & Selivanovskaya, S. Yu. (2025). Physico-chemical and microbiological characteristics of soil in the Republic of Tatarstan under different types of land use. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 17(6-1), 168-196. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-6-1-1350>

Введение

Почва является ключевым компонентом экосистем, обеспечивающим множество экологических функций, включая поддержание биоразнообразия, регулирование круговорота элементов и продуктивность агроэкосистем [37]. Агрохимические и биологические свойства почвы играют важную роль в её функционировании и устойчивости к антропогенным воздействиям. Кроме того, пригодность почвы для возделывания сельскохозяйственных культур также обусловлена этими почвенными параметрами [39]. Так, например, установлено, что для оптимального роста растений одними из наиболее важных являются характеристики структуры, плотности сложения и гранулометрического состава. Физические свойства почвы могут являться лимитирующим фактором для выращиваемых культур, так как определяют уровень аэрации, обеспеченность влагой и развитие корневой системы растений [17; 18; 25; 31].

Однако изменение типа землепользования может оказывать значительное влияние на эти свойства, определяя направленность почвенных

процессов и формируя специфические условия для развития почвенной биоты. Владение данными о состоянии свойств почвы при различных типах землепользования может способствовать пониманию процессов, связанных с функциями почвы, а также оптимальному и рациональному управлению почвенными экосистемами, что приведет в конечном итоге к повышению их качества [30].

Изменение типа землепользования может оказывать разное влияние на физические и химические характеристики почвы. Данные эффекты могут быть связаны с интенсивным механическим воздействием агротехники на почву. Например, при вовлечении почвы в сельскохозяйственное использование может наблюдаться изменение ее плотности, влагоемкости, кислотности, водопрочности структурных агрегатов [15].

Существенный вклад в изменение свойств почвы вносит избыточное и нерациональное применение удобрений, в особенности минеральных, выражающийся в ухудшении структуры и агрегатного сложения почвы, образовании поверхностной корки, нарушении аэрации, увеличении плотности, снижении гидравлической проводимости, закислении почвы [17]. При использовании минеральных удобрений в избыточном количестве в почве могут накапливаться соединения, входящие в их состав [23; 32]. Использование минеральных удобрений приводит к загрязнению почвы тяжелыми металлами и другими токсичными элементами (цинк, кадмий, свинец), которые могут вызывать изменения биологических свойств почвы, таких как активность и структура микробного сообщества [2]. При смене типа землепользования (например, при переводе пашни в залежь) может происходить изменение растительного покрова, что также может оказать воздействие на почвенные характеристики, так как будет происходить изменение количества и качества растительных остатков, поступающих в почву [19; 35].

Биологические характеристики почвы реагируют на изменения в землепользовании гораздо быстрее, чем физические и химические, так как микробные сообщества почвы особенно чувствительны к антропогенной деятельности [39]. Активность микробного сообщества, количество органического вещества и качество почвы взаимосвязаны между собой [20]. По этой причине биологические характеристики почвы в настоящее время находятся в центре внимания как индикаторы функций почвы [30].

Цель исследования. Целью работы являлась оценка влияния разных типов землепользования (пашня, сенокосный луг, укос без изъятия фитомассы, залежь) на физико-химические и микробиологические параметры серой лесной почвы.

Материалы и методы

Исследование проводилось на территории Лаишевского района Республики Татарстан в окрестностях села Тарлаши (55.564709, 49.137720). Климат региона умеренно-континентальный с теплым летом и умеренно холодной зимой. Среднегодовая температура воздуха составляет 5,1 °С, среднегодовое количество осадков – 565,2 мм. Рельеф региона исследования представляет собой слабохолмистую равнину. Почвенные разрезы в количестве 4 штук были заложены на участках со следующими типами землепользования – пашня, сенокосный луг, укос без изъятия фитомассы и залежь. Такие типы землепользования реализуются не менее 5 лет. Ранее на всех 4-х участках находились пашни. Для того, чтобы минимизировать влияние климатических факторов, данные участки имели одинаковый тип почвы (серая лесная), рельеф местности и близкое расположение друг к другу. Характеристика участков представлена в таблице 1. Согласно международной классификации почв WRB (World Reference Base for soil resources), исследуемые почвы были отнесены к *haplic Luvisol* (Calcaric, Siltic).

Таблица 1.

Характеристика участков серой лесной почвы с разным типом землепользования на территории Лаишевского района Республики Татарстан

№ раз-реза	Тип земле-пользования	Растительность	Тип почвы согласно классификации почв СССР 1977 года [10]
1	Пашня (более 5 лет)	Отсутствует	Почва серая лесная остаточ-но-карбонатная глубоковски-пающая мощная на элюво-делювии карбонатов
2	Сенокосный луг (более 5 лет)	Пырей ползучий (<i>Elytrigia repens</i>) - 70%, клевер белый (<i>Trifolium repens</i>) - 20%, подорожник средний (<i>Plantago media</i>) - 10%	Почва серая лесная остаточ-но-карбонатная глубоковски-пающая мощная на элюво-делювии карбонатов
3	Укос без изъ-ятия фито-массы (более 5 лет)	Пырей ползучий (<i>Elytrigia repens</i>) - 70%, клевер белый (<i>Trifolium repens</i>) - 18%, тысячелистник обык-новенный (<i>Achillea millefolium</i>) - 10%, одуванчик лекарственный (<i>Taraxacum officinale</i>) - 2%	Почва серая лесная остаточ-но-карбонатная мощная на элюво-делювии карбонатов
4	Залежь (более 5 лет)	Вейник наземный (<i>Calamagrostis epigejos</i>) - 60%, бодяк полевой (<i>Cirsium arvense</i>) - 40%	Почва серая лесная остаточ-но-карбонатная глубоковски-пающая мощная на элюво-делювии карбонатов

Пробы почвы отбирали из трех стенок почвенных разрезов в слоях, соответствующих почвенным горизонтам [5]. Описание морфологии профилей исследуемых почвенных разрезов представлено в дополнительных материалах к статье (таблица S1). В почве определяли следующие физико-химические свойства – влажность согласно ГОСТ 5180-2015 [8], гранулометрический состав с применением лазерного дифрактометра Microtrac Bluewave (Microtrac Retsch GmbH, Германия) [9], содержание органического вещества согласно ГОСТ 27753.10-88 [7], содержание нитратов согласно ГОСТ 26951-86 [6]. В качестве микробиологических характеристик почвы определяли респираторную активность, микробную биомассу и метаболическую активность почвенного микробного сообщества.

Респираторную активность (базальное дыхание) оценивали с использованием газового хроматографа Nexis GC-2030 и программного обеспечения Lab Solution (Shimadzu, Япония) согласно ISO 16072:2002 [29]. Навеску почвы полевой влажности массой 1 г помещали в хроматографическую виалу и инкубировали в течение 24 часов при температуре 20°C. Измерение проводили на капиллярной колонке Rt-Q-BOND 30 m с диаметром 0.53 мм и толщиной слоя нанесённой фазы 20 мкм. Скорость потока составляла 10 мл/мин, объём впрыска – 10 мкл, общее время измерения составляло 5 минут на образец.

Микробную биомассу оценивали методом субстрат-индуцированного дыхания согласно ISO 14240-1:1997 [28]. В качестве легкодоступного питательного субстрата в хроматографическую виалу с навеской почвы полевой влажности массой 1 г предварительно добавляли 10 мг D-глюкозы. Время инкубирования виал составляло 24 часа при температуре 20°C.

Общую метаболическую активность микробных сообществ почвы определяли с помощью показателя AWCD (средняя окрашенность ячеек) и коммерческих плашек Biolog Ecoplates (Biolog Inc., США). В каждую лунку 96-луночной планшеты, содержащей субстрат и индикатор окислительно-восстановительного процесса, раскапывали по 180 мкл исследуемых образцов (1:10). Планшеты инкубировали при 25 °C в течение 120 часов. Результаты оценивали фотометрически на Multiskan FC (Thermo Fisher Scientific, США) при длине волны 595 нм. Биоразнообразие микробного сообщества оценивали с помощью индекса Шеннона [21].

Все измерения проводились не менее чем в трёхкратной повторности. Статистическую обработку полученных результатов проводили с помощью Microsoft Office Excel 2010 (США). Все графические данные содержат средние значения. Для оценки значимости различий использовали

критерий Фишера при $\alpha = 0,05$. Корреляционный анализ проводили с использованием коэффициента корреляции Спирмена при $p < 0,05$.

Результаты исследования и обсуждение

Физико-химические показатели почвы исследуемых участков

Гранулометрический состав образцов почвы, отобранных с участков с разным типом землепользования представлен в таблице 2. В целом, профили почвы исследуемых участков обладали сходным гранулометрическим составом с преобладанием песчаной и илистой фракций. Горизонты профиля почвы с пашни закономерно характеризовались более однородным характером распределения частиц. В профиле почвы других типов землепользования наблюдалась дифференциация в гранулометрическом составе. Обнаружено облегчение гранулометрического состава почвы под залежью по сравнению с почвой под пашней (таблица 2). В литературе также описывается изменение соотношения фракций разного размера в почве при смене типа землепользования. Так, например, при выводе почвы из сельскохозяйственного оборота в залежь на поверхности и в верхних слоях происходит естественное развитие растительного покрова и корневых систем, что может способствовать уменьшению плотности и дополнительно влиять на гранулометрический состав за счет изменения водоудерживающей способности [1; 3]. Кроме того, разуплотнение почвы под залежью может происходить вследствие увеличения количества дождевых червей [15]. Важно отметить, что при повторном вовлечении залежи в сельскохозяйственную обработку наблюдается ухудшение агрегатного состояния, так как агрегатный состав является динамической характеристикой, подвергающейся значительному влиянию особенностей землепользования [12].

Таблица 2.

Гранулометрический состав образцов серой лесной почвы с разным типом землепользования на территории Лаишевского района Республики Татарстан

Горизонт	Глубина, см	Песчаная фракция, 2-0,05 мм, %об.	Илистая фракция, 0,05-0,002 мм, %об.	Глинистая фракция, <0,001 мм, %об.
Разрез 1 - пашня				
A _{max}	0-15	51,72	47,59	0,69
A ₁	15-50	51,45	47,55	1
A ₁ A ₂	50-60	50,16	46,48	3,36
A ₂ B	60-86	50,73	48,11	1,16
B _k	86-160	47,21	52,54	0,25

Разрез 2 – сенокосный луг				
A _л	0-2	51,56	48,09	0,35
A _{ст.пах}	2-24	51,86	47,91	0,23
A ₁	24-51	45,18	54,45	0,37
A ₁ A ₂	51-70	49,96	48,4	1,64
A ₂ B	70-104	31,62	66,81	1,57
B _к	104-164	53,1	46,52	0,38
BC _к	164 и ниже	38,52	60,77	0,71
Разрез 3 – укос без изъятия фитомассы				
A _л	0-6	61,9	38,1	0
A _{ст.пах}	6-20	44,07	55,26	0,67
A ₁ A ₂	20-35	36,96	62,07	0,97
A ₂ B	35-100	38,2	60,8	1
B _к	100 и ниже	50,82	48,39	0,79
Разрез 4 - залежь				
A _л	0-7	57,76	42,24	0
A _{ст.пах}	7-30	44,62	54,96	0,42
A ₁	30-55	44,9	53,77	1,33
A ₁ A ₂	55-80	45,36	53,63	1,01
A ₂ B	80-100	43,83	54,74	1,43
B _к	100-140	41,67	58,21	0,12

Характеристики влажности основных генетических горизонтов участков почвы, находящихся под разными типами землепользования представлены на рисунке 1. Видно, что наименьшее содержание влаги (4-5%) было характерно для верхних почвенных горизонтов независимо от характера использования почвы. В виду особенностей землепользования в профиле пашни в верхних 50 см влажность сохранялась на одном уровне (4,7-5,2%). Наибольшей влажностью (14,1%) характеризовался горизонт В (86-100 см). Далее вниз по профилю наблюдалось увеличение влажности, связанное скорее всего с тем, что пробы почвы отбирали осенью (сентябрь) после уборки урожая, и корни растений не забирали влагу с нижних горизонтов. Для почвы под сенокосным лугом максимальная влажность (17,5 %) была установлена для горизонта А₁ (24-51 см). Для профиля почвы, на которой производился укос без изъятия фитомассы, влажность принимала максимальные значения (10,4-11,2 %), начиная с глубины 35 см (горизонты А₂В и В). В профиле почвы залежи наибольшее содержание влаги наблюдалось на глубине 100-140 см (горизонт В_к). Полученные данные в целом

повторяют характер распределения влаги в исследуемом типе почвы (серая лесная), который закономерно отличается в зависимости от характера землепользования, особенностей растительного покрова и, как следствие, наличия/отсутствия корней в профиле на момент отбора образцов [12].

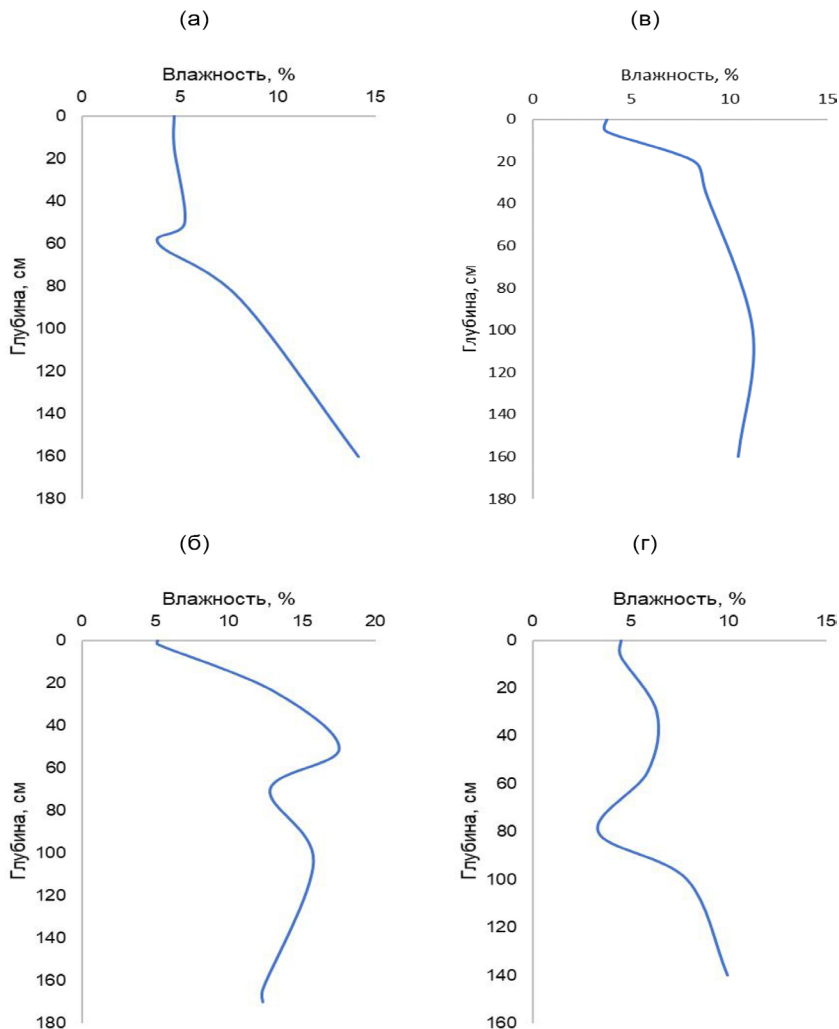


Рис. 1. Влажность почвы участков разного типа землепользования (а - пашня, б - сенокосный луг, в - укос без изъятия фитомассы, г - залежь)

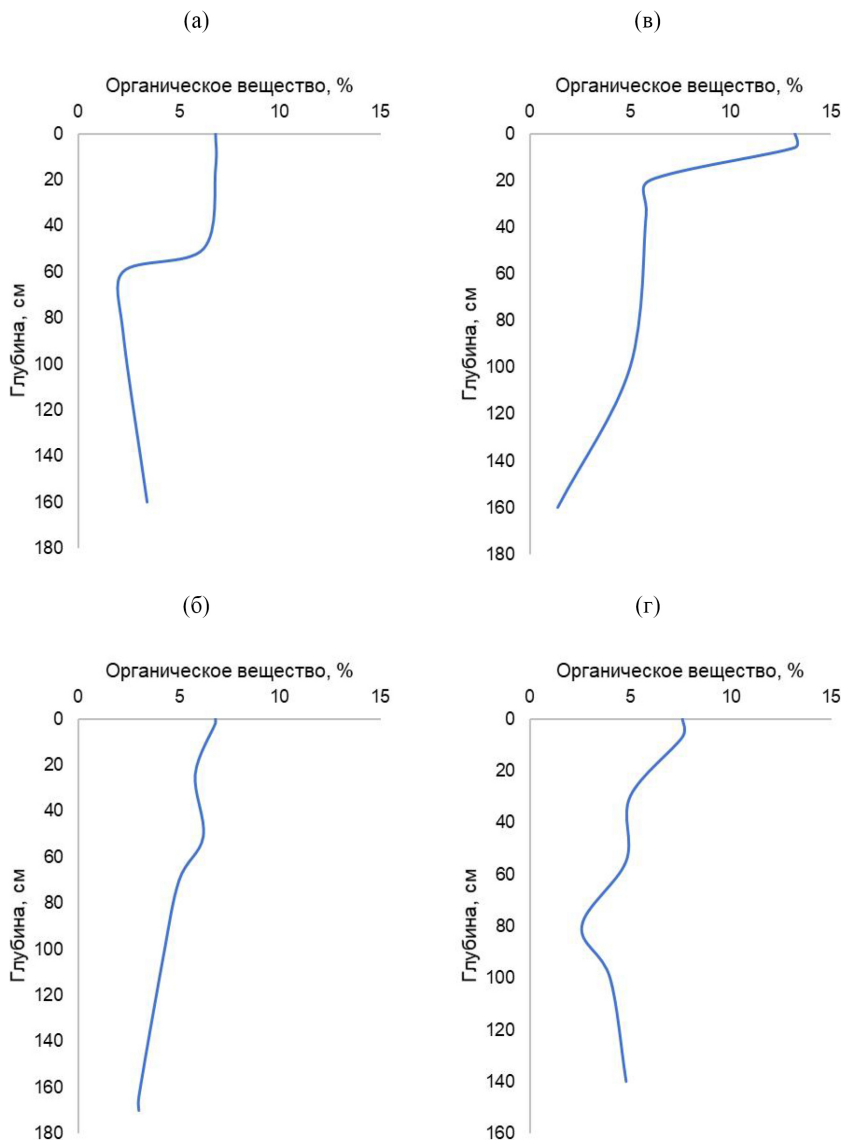


Рис. 2. Содержание органического вещества в почве участков разного типа землепользования (а - пашня, б - сенокосный луг, в - укос без изъятия фитомассы, г - залежь)

Результаты оценки содержания органического вещества представлены на рисунке 2. Наибольшее его количество (13%) было выявлено в верхних горизонтах профиля почвы, на которой производился укос без изъятия фитомассы. В верхнем слое почвы остальных типов землепользования органическое вещество находилось в диапазоне 4,7-6,2%. В профиле почвы под пашней содержание органического вещества в верхних 50 см сохранялось на одном уровне, а далее (с 60 см) наблюдалось резкое снижение до 2,1%, тогда как в почвах других типов землепользования значения данного параметра снижались постепенно. Данный эффект, вероятно, вызван периодическим внесением органических удобрений и гомогенизацией верхнего слоя почвы под пашней в результате агротехнической обработки. Интересно отметить, что в нижней части профиля почвы под залежью наблюдалась аккумуляция органического вещества до 4,8%. Органическое вещество является одним из наиболее чувствительных параметров почвы, который реагирует на смену типа использования почвы [12]. Как правило, в почвах сельскохозяйственного назначения наблюдается самое низкое содержание органического вещества, так как в результате распахивания и резкого уменьшения поступления остатков растений происходит усиление минерализации гумуса [12]. В постагрогенных почвах наблюдается тенденция постепенного увеличения содержания органического вещества с течением времени, что обусловлено поступлением большого количества отмерших растительных остатков, формированием дернины и увеличением подземной биомассы [3; 13; 33].

Распределение содержания нитратов по профилю почвы представлено на рисунке 3. Наибольшее их количество (13,6 мг/кг) обнаружено в пахотном горизонте профиля почвы под пашней, что было ожидаемо, так как на этот участок систематически вносили как минеральные азотные, так и органические (навоз крупно-рогатого скота) удобрения на протяжении не менее 5 лет. Тем не менее, согласно СанПиН 1.2.3685-21 [14] установленное содержание нитратов в почве пашни не превышало ПДК, равное 130 мг/кг. В верхних горизонтах почвы других типов землепользования содержание нитратов находилось в диапазоне 1,4-4,0 мг/кг. Результаты определения нитратов в более глубоких слоях профилей показали, что в почве под пашней наблюдалось снижение их количества до 1,5 мг/кг в середине профиля и последующая аккумуляция до 4,9 мг/кг к более глубоким горизонтам. В нижней части профиля почвы других типов землепользования содержание нитратов было схожим (0,9-1,8 мг/кг) и не изменялось с глубиной.

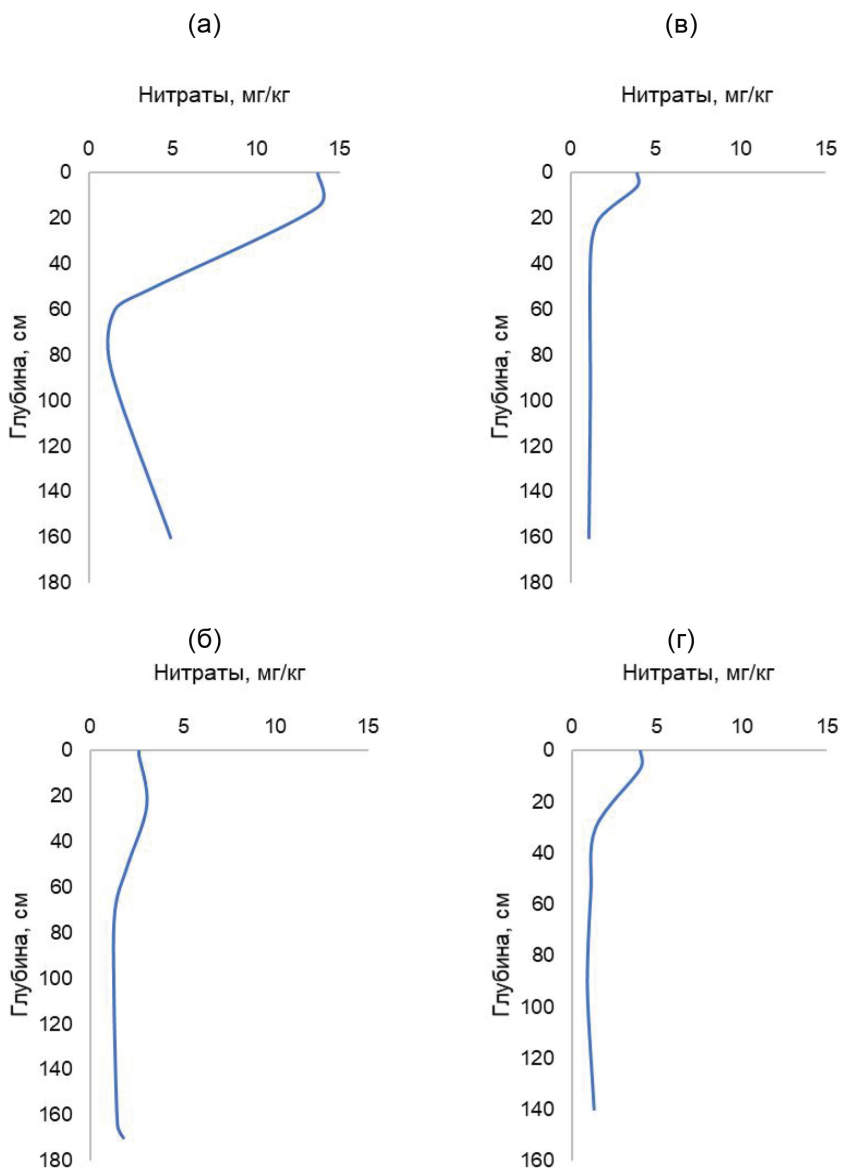


Рис. 3. Содержание нитратов в почве участков разного типа землепользования (а - пашня, б - сенокосный луг, с - укос без изъятия фитомассы, д - залежь)

Биологические показатели почвы

Результаты определения респираторной активности почвенного микробного сообщества представлены на рисунке 4. Для профилей почвы всех исследуемых типов землепользования было характерно снижение респираторной активности с глубиной. Наибольшая респираторная активность ($0,76 \text{ мкг С-CO}_2/\text{г}^*\text{ч}$) обнаружена в верхней части профиля почвы сенокосного луга. Наибольшие значения респираторной активности ($0,68 \text{ мкг С-CO}_2/\text{г}^*\text{ч}$) были также выявлены в горизонте $A_{\text{ст пак}}$ почвы, на которой осуществлялся укос без изъятия фитомассы. Интересно отметить, что в верхнем слое 0-50 см почвы под пашней уровень респираторной активности значительно не изменялся и составлял $0,28-0,31 \text{ мкг С-CO}_2/\text{г}^*\text{ч}$, что, вероятно, связано с равномерным распределением углерод- и азотсодержащих соединений в результате сельскохозяйственной обработки. В нижних горизонтах четырех исследуемых участков респираторная активность варьировала от $0,06$ до $0,22 \text{ мкг С-CO}_2/\text{г}^*\text{ч}$. Коэффициенты корреляции респираторной активности и содержания органического вещества на участках с типами землепользования пашня, сенокосный луг, укос без изъятия фитомассы и залежь составили $0,96, 0,86, -0,30$ и $0,89$, соответственно. Коэффициенты корреляции респираторной активности и содержания нитратов составили $0,69, 0,79, -0,33$ и $0,73$. В целом, полученные данные соответствуют значениям респираторной активности, представленным в литературе для серых лесных почв [4; 11; 16]. Более высокая респираторная активность в верхних слоях почвы как правило коррелирует с содержанием углерода и азота, а также с более оптимальными физическими условиями (плотность, содержание воды, текстура, пористость) для почвенных микроорганизмов [34]. Изменение респираторной активности в профиле почвы исследуемых типов землепользования обусловлены разным содержанием органических соединений, количеством поступающих в почву свежих растительных остатков, а также наличием или отсутствием механической обработки почвы [26; 34].

Оценка содержания микробной биомассы в почве разных типов землепользования представлена на рисунке 5. Установлено более высокое содержание биомассы микроорганизмов в верхних слоях почвы независимо от характера использования. В профиле почвы под пашней основное количество микроорганизмов было сосредоточено в верхнем слое до 60 см, значения биомассы варьировали от $42,2$ до $145,5 \text{ мг/кг}$. Начиная с 60 см наблюдался резкий переход, и микробная биомасса далее значительно не изменялась, оставаясь в диапазоне $42,07-45,28 \text{ мг/кг}$.

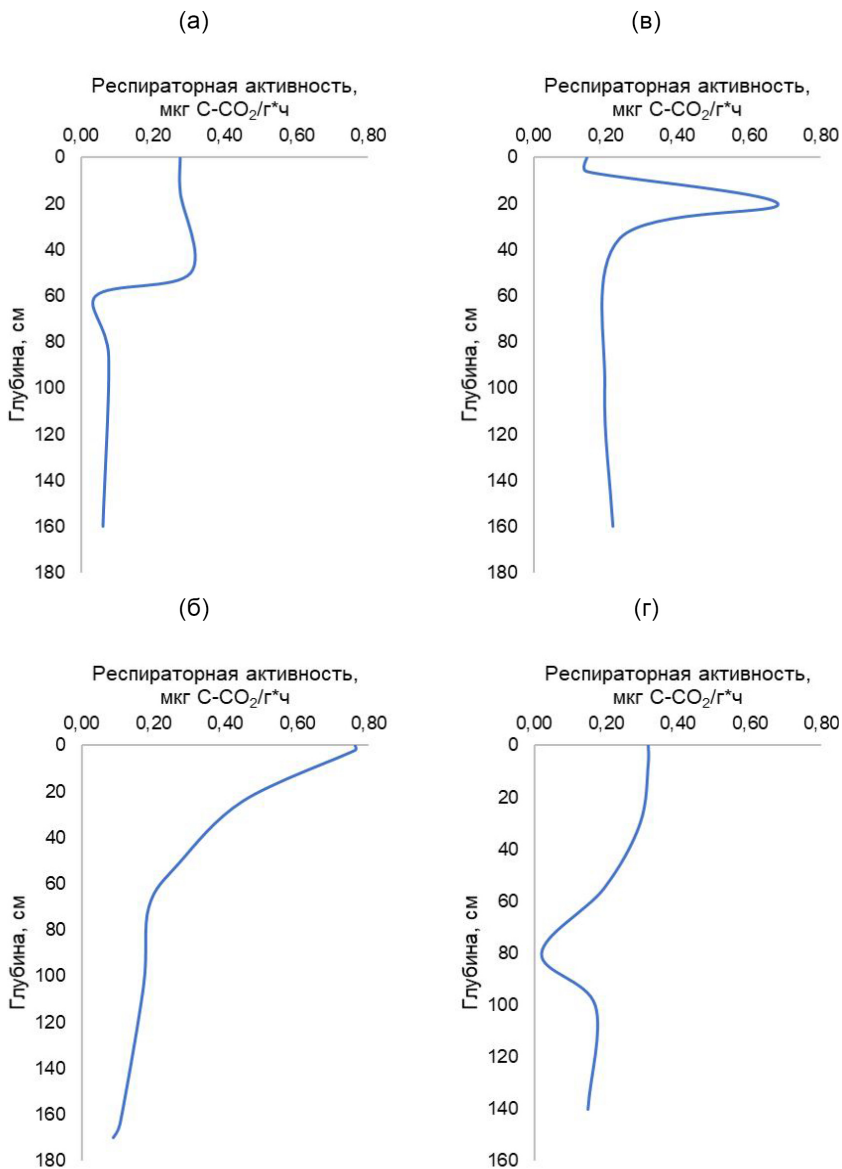


Рис. 4. Респираторная активность почвы участков разного типа землепользования (а - пашня, б - сенокосный луг, в - укос без изъятия фитомассы, г - залежь)

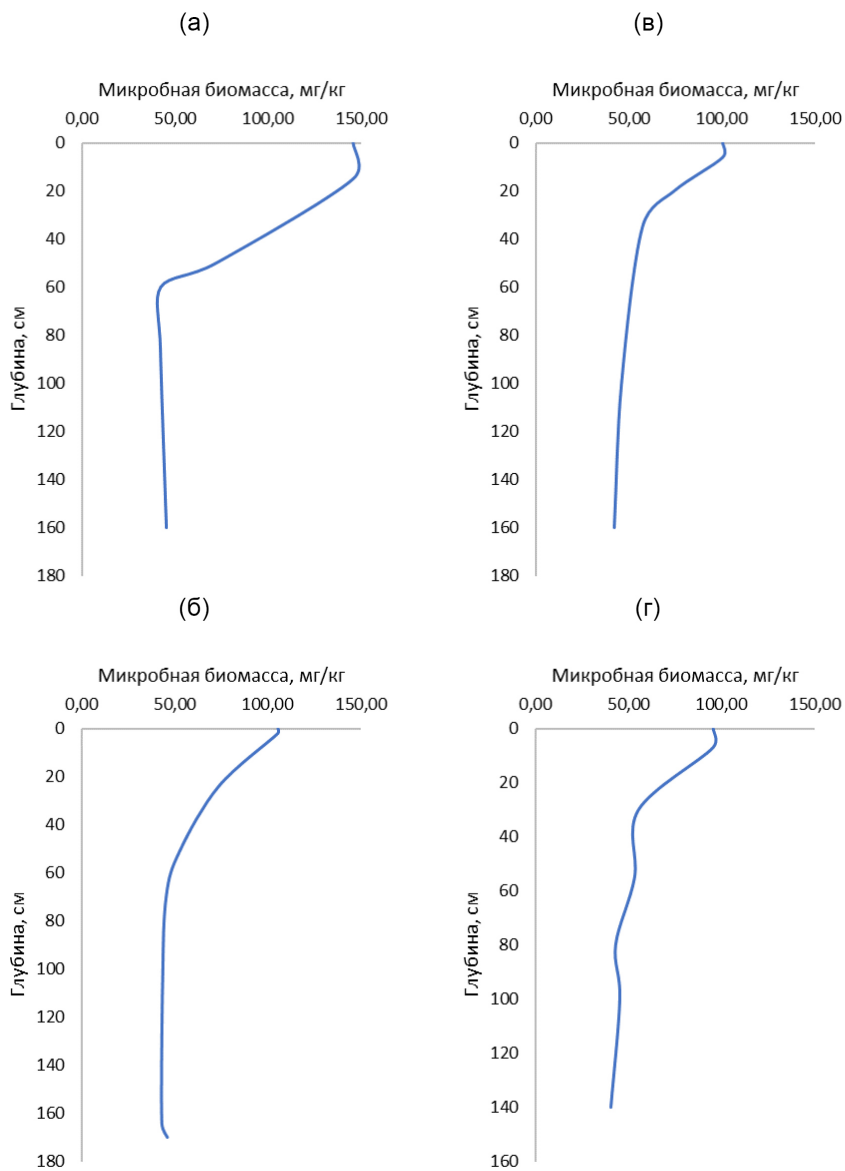


Рис. 5. Микробная биомасса почвы участков разного типа землепользования (а - пашня, б - сенокосный луг, в - укос без изъятия фитомассы, г - залежь)

В верхних горизонтах почвы с типами землепользования сенокосный луг, укос без изъятия фитомассы и залежь значения микробной биомассы были ниже по сравнению с почвой пашни – от 52,87 до 105,79 мг/кг, при этом ее снижение вглубь профиля происходило более постепенно. Коэффициенты корреляции микробной биомассы и содержания органического вещества на участках с типами землепользования пашня, сенокосный луг, укос без изъятия фитомассы и залежь составили 0,88, 0,79, 0,95 и 0,92, соответственно. Коэффициенты корреляции микробной биомассы и респираторной активности составили 0,79, 0,99, -0,08 и 0,78. Аналогичное профильное распределение биомассы микроорганизмов в почве представлено в ряде других исследований [24; 36; 40]. Почвенные микроорганизмы чувствительны к изменению условий окружающей среды, поэтому их количество в почве зависит от ряда факторов – климатических условий (температура, влажность), физических (плотность, структура и аэрация почвы) и химических (рН, содержание минеральных питательных веществ и органических соединений) свойств почвы [26; 34].

В таблице 3 представлены результаты оценки метаболической активности микробного сообщества почвы с помощью индекса AWCD и индекса Шеннона. Наибольшие значения метаболической активности и функционального разнообразия установлены для верхних горизонтов почвы независимо от характера землепользования. При этом максимальное значение индекса AWCD (1,413) выявлено для профиля почвы, на которой осуществлялся укос без изъятия фитомассы. В верхних 50 см отмечено резкое снижение значений индекса AWCD для почв со следующими типами использования – пашня, укос без изъятия фитомассы и залежь. В этом же слое (0-50 см) в почве под сенокосным лугом значения индекса AWCD оставались практически неизменными и варьировали от 0,944 до 1,275. Минимальные значения индекса AWCD (0,082-0,230) закономерно выявлены в нижних почвенных горизонтах независимо от типа землепользования.

По аналогии с функциональным разнообразием максимальное видовое разнообразие было также установлено для верхних слоев почвы всех четырех типов землепользования. Значения индекса Шеннона варьировали от 2,317 до 3,285. Было отмечено снижение видового разнообразия в середине профиля почвы со следующими типами землепользования – пашня, укос без изъятия фитомассы, залежь. В почве под сенокосным лугом в верхних 100 см видовое разнообразие сохранялось на высоком уровне (индекс Шеннона = 2,680-3,115) с последующим снижением в более глубоких горизонтах (индекс Шеннона = 2,004-2,236).

Таблица 3.

**Результаты оценки метаболической активности (индекс AWCD)
и видового разнообразия (индекс Шеннона) в почве участков
разного типа землепользования**

Горизонт	Глубина, см	Индекс AWCD	Индекс Шеннона
Разрез 1 - пашня			
A _{пах}	0-15	1,299	3,193
A ₁	15-50	0,663	3,041
A ₁ A ₂	50-60	0,362	2,141
A ₂ B	60-86	0,401	2,620
B _к	86-160	0,082	1,858
Разрез 2 – сенокосный луг			
A _л	0-2	1,055	3,115
A _{сг.пах}	2-24	1,275	3,118
A ₁	24-51	0,944	2,970
A ₁ A ₂	51-70	0,316	2,680
A ₂ B	70-104	0,609	2,796
B _к	104-164	0,093	2,236
BC _к	164 и ниже	0,201	2,004
Разрез 3 – укос без изъятия фитомассы			
A _л	0-6	1,413	3,285
A _{сг.пах}	6-20	0,852	3,140
A ₁ A ₂	20-35	0,162	2,398
A ₂ B	35-100	0,261	2,550
B _к	100 и ниже	0,084	2,091
Разрез 4 - залежь			
A _л	0-7	0,997	3,085
A _{сг.пах}	7-30	0,273	2,317
A ₁	30-55	0,072	1,209
A ₁ A ₂	55-80	0,068	1,575
A ₂ B	80-100	0,120	2,158
B _к	100-140	0,230	2,404

В литературе также представлены данные о снижении функциональной активности и видового разнообразия микробного сообщества почвы с глубиной. На данную тенденцию оказывают влияние многочисленные факторы, включая изменение физических и химических свойств почвы, доступность питательных веществ, содержание углерода и воды, обеспеченность кислородом [22; 24; 38]. Кроме того, наличие или отсутствие в

профиле почвы корней растений также может влиять на индексы AWCD и Шеннона, так как выделяемые корнями экссудаты используются микроорганизмами в качестве питательного субстрата [34]. Тип землепользования также может влиять на разнообразие и активность микробного сообщества почвы, так как гомогенизация верхнего слоя почвы и внесение удобрений изменяют свойства среды обитания [22; 27].

Заключение

Установлено, что тип землепользования оказывает влияние на физико-химические и биологические свойства почвы. В результате сельскохозяйственной деятельности в почве под пашней выявлена гомогенизация верхнего слоя и связанное с этим более однородное распределение фракций песка и ила, а также изменение профильного содержания влаги, органического вещества и нитратов. Кроме того, в почве под пашней обнаружено изменение респираторной активности и увеличение микробной биомассы в верхней части профиля. В то же время, установлено, что естественные типы землепользования, такие как укос без изъятия фитомассы, сенокосный луг и залежь, способствуют восстановлению почвенных свойств, увеличению содержания органического вещества и разнообразия микробного сообщества. Показано, что укос без изъятия фитомассы приводит к активизации микробного сообщества (увеличению его разнообразия и степени потребления углеродсодержащих субстратов) за счет постоянного поступления остатков растений, а, значит, и к максимальному накоплению органического вещества. Почва, находящаяся под сенокосным лугом, испытывает меньшее антропогенное воздействие по сравнению с пашнями. Полученные данные подчеркивают важность рационального управления почвенными ресурсами для поддержания их плодородия и экологических функций.

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

Информация о спонсорстве. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 24-76-00066.

Список литературы

1. Азаренко (Мясникова), М. А., Казеев, К. Ш., & Ермолаева, О. Ю. (2020). Изменение растительного покрова и биологических свойств чернозёмов в постагрогенный период. *Почвоведение*, (11), 1412–1422. <https://doi.org/10.31857/S0032180X20110039>. EDN: <https://elibrary.ru/PPTQHZ>

2. Бузетти, К. Д., & Иванов, М. В. (2020). Воздействие минеральных и органических удобрений на экосистему, качество сельскохозяйственной продукции и здоровье человека. *Аграрная наука*, (5), 80–84. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2020-338-5-80-84>. EDN: <https://elibrary.ru/DQLGFZ>
3. Бурдуковский, М. Л., Голов, В. И., & Перепелкина, П. А. (2021). Агрогенные и постагрогенные изменения запасов углерода и физических свойств подбелов темногумусовых. *Почвоведение*, (6), 747–756. <https://doi.org/10.31857/S0032180X21060046>. EDN: <https://elibrary.ru/WCEYQL>
4. Вершинин, А. А., Петров, А. М., & Каримуллин, Л. К. (2017). Дыхательная активность почв в окрестностях Нижнекамского промышленного комплекса. *Экология почв*, (15), 31–34. EDN: <https://elibrary.ru/ZHBEYN>
5. ГОСТ 17.4.4.02-2017. *Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа* (2017, с. 1–18).
6. ГОСТ 26951-86. *Почвы. Определение нитратов ионометрическим методом* (1986, с. 1–10).
7. ГОСТ 27753.10-88. *Грунты тепличные. Метод определения органического вещества* (1988, с. 1–4).
8. ГОСТ 5180-2015. *Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик* (2019, с. 1–23).
9. ГОСТ Р 8.777-2011. *Государственная система обеспечения единства измерений. Дисперсный состав аэрозолей и взвесей. Определение размеров частиц по дифракции лазерного излучения* (2019, с. 1–11).
10. Егоров, В. В., Иванова, Е. Н., & Фридланд, В. М. (1977). *Классификация и диагностика почв СССР*. Москва: Колос, с. 1–225. EDN: <https://elibrary.ru/YWWBDV>
11. Курганова, И. Н. (2018). Влияние процессов естественного лесовосстановления на микробиологическую активность постагрогенных почв европейской части России. *Лесоведение*, (1), 3–23. <https://doi.org/10.7868/S0024114818010011>. EDN: <https://elibrary.ru/GSZZSU>
12. Курганова, И. Н., де Гереню, В. О. Л., & Смоленцева, Е. Н. (2021). Влияние типа землепользования на физические свойства чернозёмов лесостепной зоны Западной Сибири. *Почвоведение*, (9), 1061–1075. <https://doi.org/10.31857/S0032180X21090045>. EDN: <https://elibrary.ru/HWOICG>
13. Рыжова, И. М., Ерохова, А. А., & Подвезённая, М. А. (2014). Динамика и структура запасов углерода в постагрогенных экосистемах южной тайги. *Почвоведение*, (12), 1426–1435. <https://doi.org/10.7868/S0032180X14090111>. EDN: <https://elibrary.ru/SXIZKZ>

14. СанПиН 1.2.3685-21. *Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания* (2021, с. 1–988).
15. Сахаров, А. В., Мищенко, В. В., & Еремин, Д. И. (2020). Агрофизические свойства чернозёма выщелоченного при различном его использовании в лесостепной зоне Зауралья. *Вестник Курганской ГСХА*, (3), 62–67. EDN: <https://elibrary.ru/VMBQXC>
16. Соколова, Л. Г., Зорина, С. Ю., & Белоусова, Е. Н. (2021). Эмиссия CO₂ из почвы при введении краткосрочной сидерации в паровое поле в условиях лесостепной зоны Прибайкалья. *Почвоведение*, (10), 1262–1273. <https://doi.org/10.31857/S0032180X21100117>. EDN: <https://elibrary.ru/XALIFX>
17. Филиппова, О. И., Холодов, В. А., & Сафронова, Н. А. (2019). Микроагрегатный, гранулометрический и агрегатный состав гумусовых горизонтов зонального ряда почв европейской России. *Почвоведение*, (3), 335–347. <https://doi.org/10.1134/S0032180X19030031>. EDN: <https://elibrary.ru/VUFCWH>
18. Холодов, В. А., Ярославцева, Н. В., & Фарходов, Ю. Р. (2019). Изменение соотношения фракций агрегатов в гумусовых горизонтах чернозёмов в различных условиях землепользования. *Почвоведение*, (2), 184–193. <https://doi.org/10.1134/S0032180X19020060>. EDN: <https://elibrary.ru/YVZMRV>
19. Bakhshandeh, E., Hossieni, M., & Zeraatpisheh, M. (2019). Land use change effects on soil quality and biological fertility: A case study in northern Iran. *European Journal of Soil Biology*, 95(8), 103119.
20. Basso, F., Bove, E., & Dumontet, S. (2000). Evaluating environmental sensitivity at the basin scale through the use of geographic information systems and remotely sensed data: An example covering the Agri basin (Southern Italy). *Catena*, 40(1), 19–35. EDN: <https://elibrary.ru/AFPEPF>
21. 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. EDN: <https://elibrary.ru/AIRYOV>
22. Brewer, T. E., Aronson, E. L., & Arogyaswamy, K. (2019). Ecological and genomic attributes of novel bacterial taxa that thrive in subsurface soil horizons. *mBio*, 10(5), 1–14.
23. Chen, X., Yan, X., & Wang, M. (2022). Long-term excessive phosphorus fertilization alters soil phosphorus fractions in the acidic soil of pomelo orchards. *Soil & Tillage Research*, 215, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105214>. EDN: <https://elibrary.ru/FOKZGM>
24. Eilers, K. G., Debenport, S., & Anderson, S. (2012). Digging deeper to find unique microbial communities: The strong effect of depth on the structure of

- bacterial and archaeal communities in soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 50, 58–65.
25. Franzluebbers, A. J. (2002). Water infiltration and soil structure related to organic matter and its stratification with depth. *Soil & Tillage Research*, 66(2), 197–205. EDN: <https://elibrary.ru/AXVEIN>
 26. Hao, J., Chai, Y. N., & Lopes, L. D. (2021). The effects of soil depth on the structure of microbial communities in agricultural soils in Iowa (United States). *Applied and Environmental Microbiology*, 87(4), 1–17.
 27. Huang, R., Li, W., & Qiu, S. (2025). Impact of land use types on soil microbial community structure and functional structure in Baihualing Village, China. *Global Ecology and Conservation*, 57, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2024.e03379>. EDN: <https://elibrary.ru/XKIQZP>
 28. ISO 14240-1:1997. *Soil quality — Determination of soil microbial biomass. Part 1: Substrate-induced respiration method* (1997, vol. 1, pp. 1–5).
 29. ISO 16072:2002. *Soil quality — Laboratory methods for determination of microbial soil respiration* (2002, vol. 1, pp. 1–11).
 30. Kooch, Y., Kartalaei, Z. M., & Haghverdi, K. (2023). Soil function indicators are influenced by land use of different ages: A case study in a semi-arid region. *Science of the Total Environment*, 861(10), 160570.
 31. Lipiec, J., & Hatano, R. (2003). Quantification of compaction effects on soil physical properties and crop growth. *Geoderma*, 116(1–2), 107–136. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00097-1](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00097-1). EDN: <https://elibrary.ru/XNZRGP>
 32. López-Bellido, L., Muñoz-Romero, V., & López-Bellido, R. J. (2013). Nitrate accumulation in the soil profile: Long-term effects of tillage, rotation and N rate in a Mediterranean Vertisol. *Soil & Tillage Research*, 130, 18–23.
 33. Markewitz, D., Sartori, F., & Craft, C. (2002). Soil change and carbon storage in longleaf pine stands planted on marginal agricultural lands. *Ecological Applications*, 12(5), 1276–1285.
 34. Naylor, D., McClure, R., & Jansson, J. (2022). Trends in microbial community composition and function by soil depth. *Microorganisms*, 10(3), 1–26. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10030540>. EDN: <https://elibrary.ru/NABNCY>
 35. Oliveira, S. P. de, Lacerda, N. B. de, & Blum, S. C. (2015). Organic carbon and nitrogen stocks in soils of Northeastern Brazil converted to irrigated agriculture. *Land Degradation & Development*, 26(1), 9–21.
 36. Spohn, M., Klaus, K., & Wanek, W. (2016). Microbial carbon use efficiency and biomass turnover times depending on soil depth — Implications for carbon cycling. *Soil Biology and Biochemistry*, 96, 74–81.

37. Telo da Gama, J. (2023). The role of soils in sustainability, climate change, and ecosystem services: Challenges and opportunities. *Ecologies*, 4(3), 552–567. <https://doi.org/10.3390/ecologies4030036>. EDN: <https://elibrary.ru/ROFSPS>
38. Tripathi, B. M., Kim, H. M., & Jung, J. Y. (2019). Distinct taxonomic and functional profiles of the microbiome associated with different soil horizons of a moist tussock tundra in Alaska. *Frontiers in Microbiology*, 10(6), 1–14. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.01442>. EDN: <https://elibrary.ru/BAIIGO>
39. Yang, T., Lupwayi, N., & Marc, S. A. (2021). Anthropogenic drivers of soil microbial communities and impacts on soil biological functions in agroecosystems. *Global Ecology and Conservation*, 27, 1–27. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2021.e01521>. EDN: <https://elibrary.ru/TTSTLW>
40. Young, J. M., Skvortsov, T., & Kelleher, B. P. (2019). Effect of soil horizon stratigraphy on the microbial ecology of alpine paleosols. *Science of the Total Environment*, 657(11), 1183–1193. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.442>. EDN: <https://elibrary.ru/KYLWRS>

References

1. Azarenko (Myasnikova), M. A., Kazeev, K. Sh., & Ermolaeva, O. Yu. (2020). Changes in vegetation cover and biological properties of chernozems in the post-agrogenic period. *Soil Science*, (11), 1412–1422. <https://doi.org/10.31857/S0032180X20110039>. EDN: <https://elibrary.ru/PPTQHZ>
2. Buzetti, K. D., & Ivanov, M. V. (2020). Impact of mineral and organic fertilizers on the ecosystem, agricultural product quality, and human health. *Agrarian Science*, (5), 80–84. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2020-338-5-80-84>. EDN: <https://elibrary.ru/DQLGFZ>
3. Burdukovskiy, M. L., Golov, V. I., & Perepelkina, P. A. (2021). Agrogenic and post-agrogenic changes in carbon stocks and physical properties of dark humus podbels. *Soil Science*, (6), 747–756. <https://doi.org/10.31857/S0032180X21060046>. EDN: <https://elibrary.ru/WCEYQL>
4. Vershinin, A. A., Petrov, A. M., & Karimullin, L. K. (2017). Respiratory activity of soils in the vicinity of the Nizhnekamsk industrial complex. *Soil Ecology*, (15), 31–34. EDN: <https://elibrary.ru/ZHBEYN>
5. GOST 17.4.4.02–2017. *Soils. Methods for sampling and preparing samples for chemical, bacteriological, and helminthological analysis* (2017, pp. 1–18)
6. GOST 26951–86. *Soils. Determination of nitrates by ionometric method* (1986, pp. 1–10)
7. GOST 27753.10–88. *Greenhouse soils. Method for determining organic matter* (1988, pp. 1–4)

8. GOST 5180–2015. *Soils. Methods for laboratory determination of physical characteristics* (2019, pp. 1–23)
9. GOST R 8.777–2011. *State system for ensuring the uniformity of measurements. Disperse composition of aerosols and suspensions. Determination of particle size by laser diffraction* (2019, pp. 1–11)
10. Egorov, V. V., Ivanova, E. N., & Fridland, V. M. (1977). *Classification and diagnostics of soils of the USSR*. Moscow: Kolos, pp. 1–225. EDN: <https://elibrary.ru/YWWBDV>
11. Kurganova, I. N. (2018). Influence of natural reforestation processes on the microbiological activity of post-agrogenic soils in the European part of Russia. *Forest Science*, (1), 3–23. <https://doi.org/10.7868/S0024114818010011>. EDN: <https://elibrary.ru/GSZZSU>
12. Kurganova, I. N., de Gerenyu, V. O. L., & Smolentseva, E. N. (2021). Influence of land use type on the physical properties of chernozems in the forest-steppe zone of Western Siberia. *Soil Science*, (9), 1061–1075. <https://doi.org/10.31857/S0032180X21090045>. EDN: <https://elibrary.ru/HWOICG>
13. Ryzhova, I. M., Erokhova, A. A., & Podvezyonnaya, M. A. (2014). Dynamics and structure of carbon stocks in post-agrogenic ecosystems of the southern taiga. *Soil Science*, (12), 1426–1435. <https://doi.org/10.7868/S0032180X14090111>. EDN: <https://elibrary.ru/SXIZKZ>
14. SanPiN 1.2.3685–21. *Hygienic standards and requirements for ensuring safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans* (2021, pp. 1–988)
15. Sakharov, A. V., Mishchenko, V. V., & Eremin, D. I. (2020). Agro-physical properties of leached chernozem under different uses in the forest-steppe zone of the Trans-Urals. *Bulletin of the Kurgan State Agricultural Academy*, (3), 62–67. EDN: <https://elibrary.ru/VMBQXC>
16. Sokolova, L. G., Zorina, S. Yu., & Belousova, E. N. (2021). CO₂ emission from soil when introducing short-term green manuring into a fallow field in the forest-steppe zone of the Baikal region. *Soil Science*, (10), 1262–1273. <https://doi.org/10.31857/S0032180X21100117>. EDN: <https://elibrary.ru/XALIFX>
17. Filippova, O. I., Kholodov, V. A., & Safronova, N. A. (2019). Microaggregate, particle size, and aggregate composition of humus horizons in the zonal soil series of European Russia. *Soil Science*, (3), 335–347. <https://doi.org/10.1134/S0032180X19030031>. EDN: <https://elibrary.ru/VUFCWH>
18. Kholodov, V. A., Yaroslavtseva, N. V., & Farhodov, Yu. R. (2019). Changes in the ratio of aggregate fractions in humus horizons of chernozems under different land use conditions. *Soil Science*, (2), 184–193. <https://doi.org/10.1134/S0032180X19020060>. EDN: <https://elibrary.ru/YVZMRV>

19. Bakhshandeh, E., Hossieni, M., & Zeraatpisheh, M. (2019). Land use change effects on soil quality and biological fertility: A case study in northern Iran. *European Journal of Soil Biology*, 95(8), 103119.
20. Basso, F., Bove, E., & Dumontet, S. (2000). Evaluating environmental sensitivity at the basin scale through the use of geographic information systems and remotely sensed data: An example covering the Agri basin (Southern Italy). *Catena*, 40(1), 19–35. EDN: <https://elibrary.ru/AFPEPF>
21. 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. EDN: <https://elibrary.ru/AIRYOV>
22. Brewer, T. E., Aronson, E. L., & Arogyaswamy, K. (2019). Ecological and genomic attributes of novel bacterial taxa that thrive in subsurface soil horizons. *mBio*, 10(5), 1–14.
23. Chen, X., Yan, X., & Wang, M. (2022). Long-term excessive phosphorus fertilization alters soil phosphorus fractions in the acidic soil of pomelo orchards. *Soil & Tillage Research*, 215, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105214>. EDN: <https://elibrary.ru/FOKZGM>
24. Eilers, K. G., Debenport, S., & Anderson, S. (2012). Digging deeper to find unique microbial communities: The strong effect of depth on the structure of bacterial and archaeal communities in soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 50, 58–65.
25. Franzluebbers, A. J. (2002). Water infiltration and soil structure related to organic matter and its stratification with depth. *Soil & Tillage Research*, 66(2), 197–205. EDN: <https://elibrary.ru/AXVEIN>
26. Hao, J., Chai, Y. N., & Lopes, L. D. (2021). The effects of soil depth on the structure of microbial communities in agricultural soils in Iowa (United States). *Applied and Environmental Microbiology*, 87(4), 1–17.
27. Huang, R., Li, W., & Qiu, S. (2025). Impact of land use types on soil microbial community structure and functional structure in Baihualing Village, China. *Global Ecology and Conservation*, 57, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2024.e03379>. EDN: <https://elibrary.ru/XKIQZP>
28. ISO 14240-1:1997. *Soil quality — Determination of soil microbial biomass. Part 1: Substrate-induced respiration method* (1997, vol. 1, pp. 1–5).
29. ISO 16072:2002. *Soil quality — Laboratory methods for determination of microbial soil respiration* (2002, vol. 1, pp. 1–11).
30. Kooch, Y., Kartalaei, Z. M., & Haghverdi, K. (2023). Soil function indicators are influenced by land use of different ages: A case study in a semi-arid region. *Science of the Total Environment*, 861(10), 160570.

31. Lipiec, J., & Hatano, R. (2003). Quantification of compaction effects on soil physical properties and crop growth. *Geoderma*, 116(1–2), 107–136. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00097-1](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00097-1). EDN: <https://elibrary.ru/XNZRGP>
32. López-Bellido, L., Muñoz-Romero, V., & López-Bellido, R. J. (2013). Nitrate accumulation in the soil profile: Long-term effects of tillage, rotation and N rate in a Mediterranean Vertisol. *Soil & Tillage Research*, 130, 18–23.
33. Markewitz, D., Sartori, F., & Craft, C. (2002). Soil change and carbon storage in longleaf pine stands planted on marginal agricultural lands. *Ecological Applications*, 12(5), 1276–1285.
34. Naylor, D., McClure, R., & Jansson, J. (2022). Trends in microbial community composition and function by soil depth. *Microorganisms*, 10(3), 1–26. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10030540>. EDN: <https://elibrary.ru/NABNCY>
35. Oliveira, S. P. de, Lacerda, N. B. de, & Blum, S. C. (2015). Organic carbon and nitrogen stocks in soils of Northeastern Brazil converted to irrigated agriculture. *Land Degradation & Development*, 26(1), 9–21.
36. Spohn, M., Klaus, K., & Wanek, W. (2016). Microbial carbon use efficiency and biomass turnover times depending on soil depth — Implications for carbon cycling. *Soil Biology and Biochemistry*, 96, 74–81.
37. Telo da Gama, J. (2023). The role of soils in sustainability, climate change, and ecosystem services: Challenges and opportunities. *Ecologies*, 4(3), 552–567. <https://doi.org/10.3390/ecologies4030036>. EDN: <https://elibrary.ru/ROFSPS>
38. Tripathi, B. M., Kim, H. M., & Jung, J. Y. (2019). Distinct taxonomic and functional profiles of the microbiome associated with different soil horizons of a moist tussock tundra in Alaska. *Frontiers in Microbiology*, 10(6), 1–14. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.01442>. EDN: <https://elibrary.ru/BAIIGO>
39. Yang, T., Lupwayi, N., & Marc, S. A. (2021). Anthropogenic drivers of soil microbial communities and impacts on soil biological functions in agroecosystems. *Global Ecology and Conservation*, 27, 1–27. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2021.e01521>. EDN: <https://elibrary.ru/TTSTLW>
40. Young, J. M., Skvortsov, T., & Kelleher, B. P. (2019). Effect of soil horizon stratigraphy on the microbial ecology of alpine paleosols. *Science of the Total Environment*, 657(11), 1183–1193. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.442>. EDN: <https://elibrary.ru/KYLWRS>

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, канд. 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*

Бабичук Вячеслав Романович, лаборант-исследователь НИЛ GreenAgro

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет»

*ул. Кремлевская, 18, г. Казань, 420008, Российская Федерация
slavababichuk@gmail.com*

Бикташева Лилия Рамилевна, канд. 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*

Окунев Родион Владимирович, канд. биол. наук, доцент кафедры почвоведения

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет»

*ул. Кремлевская, 18, г. Казань, 420008, Российская Федерация
tutinkaz@yandex.ru*

Курынцева Полина Александровна, канд. 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*

Селивановская Светлана Юрьевна, д-р 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

Vyacheslav R. Babichuk, Laboratory Research Assistant at the GreenAgro Research Laboratory
Kazan (Volga Region) Federal University
18, Kremlevskaya Str., Kazan, 420008, Russian Federation
slavababichuk@gmail.com
SPIN-code: 2295-7917

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

Rodion V. Okunev, PhD (Biology), Associate Professor of the Department of Soil Science
Kazan (Volga Region) Federal University

18, Kremlevskaya Str., Kazan, 420008, Russian Federation

tutinkaz@yandex.ru

SPIN-code: 8371-3829

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6927-6983>

ResearcherID: M-7676-2016

Scopus Author ID: 56156815600

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

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 02.05.2025

После рецензирования 04.06.2025

Принята 10.06.2025

Received 02.05.2025

Revised 04.06.2025

Accepted 10.06.2025