

ISSN 0136–1694 (Print)  
ISSN 2312-4202 (Online)

ФГБНУ ФИЦ «ПОЧВЕННЫЙ ИНСТИТУТ ИМ. В.В. ДОКУЧАЕВА»

---

**БЮЛЛЕТЕНЬ**  
**ПОЧВЕННОГО ИНСТИТУТА**  
**имени В.В. ДОКУЧАЕВА**

**Выпуск 126**

**Москва**  
**2025**  
<https://bulletin.esoil.ru>

ISSN 0136–1694 (Print)  
ISSN 2312-4202 (Online)

**V.V. DOKUCHAEV SOIL SCIENCE INSTITUTE**

---

**Dokuchaev Soil Bulletin**  
**(Byulleten Pochvennogo instituta**  
**imeni V.V. Dokuchaeva)**

**Volume 126**

**Moscow  
2025**

<https://bulletin.esoil.ru>

ББК П03  
Б 98  
УДК 631.4

**Главный редактор:**  
**Иванов А. Л., академик РАН**

**Заместитель главного редактора:**  
**Савин И. Ю., академик РАН**

**Редакционная коллегия:**

**А-Ксин Джу** (университет Висконсина, США)  
**Когут Б. М.** (Почвенный институт им. В.В. Докучаева, Москва)  
**Монтанарелла Л.** (Институт окружающей среды и устойчивого развития Объединенного исследовательского центра Европейской комиссии, Италия)  
**Розанов А. Б.** (Университет Стелленбош, ЮАР)  
**Тихонович И. А.**, академик РАН (Санкт-Петербургский университет, Санкт-Петербург)  
**Тот Г.** (Университет Паннонии, Венгрия)  
**Хитров Н. Б.** (Почвенный институт им. В.В. Докучаева, Москва)  
**Ченdev Ю. Г.** (Белгородский государственный университет, Белгород)  
**Швиденко А. З.** (Международный институт прикладного системного анализа, Австрия)  
**Шишков Т. А.** (Институт почвоведения им. Н. Пушкарова, Болгария)

**Chief Editor:**  
**A. L. Ivanov, Academician of RAS**

**Deputy Chief Editor:**  
**I. Yu. Savin, Academician of RAS**

**Editorial board:**

**A-Xing Zhu** (University of Wisconsin-Madison, USA)  
**B. M. Kogut** (V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, Russia)  
**L. Montanarella** (Institute for Environment and Sustainability – European Commission’s Joint Research Centre (IES JRC), Italy)  
**A. B. Rozanov** (Stellenbosch University, Republic of South Africa)  
**I. A. Tikhonovich**, Academician of RAS (Saint Petersburg State University, Russia)  
**G. Toth** (University of Pannonia, Hungary)  
**N. B. Khitrov** (V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, Russia)  
**Yu. G. Chendev** (Belgorod State University, Russia)  
**A. Z. Shvidenko** (International Institute for Applied Systems Analysis, Austria)  
**T. A. Shishkov** (Pushkarov Soil Science Institute, Bulgaria)

## СОДЕРЖАНИЕ

Луговые почвы на Почвенной карте РСФСР масштаба 1 : 2.5 млн в системе классификации почв России	
<i>Ананко Т.В., Герасимова М.И.</i> .....	5
Почвообразование на дериватах плотных пород различного состава в Забайкалье	
<i>Гынинова А.Б., Бадмаев Н.Б., Куликов А.И., Гынинова Б.Д., Мангатаев А.Ц., Рампилов М.О.</i> .....	37
Особенности дистанционной диагностики агрохимических свойств пахотных почв	
<i>Прудникова Е.Ю., Савин И.Ю., Виндекер Г.В., Вернюк Ю.И., Ребух Н.Я., Фомичева Н.В., Кавиза Н.Д.</i> .....	68
Особенности структуры почвенного покрова горнопромышленных комплексов Ленинградской области	
<i>Моргач Ю.Р., Сухачева Е.Ю.</i> .....	90
Ландшафтно-позиционная обусловленность вывода из сельскохозяйственного оборота земель Нечерноземья на примере Калининского муниципального округа Тверской области	
<i>Устимук Г.М., Лозбенев Н.И.</i> .....	117
Оценка влияния различных систем землепользования на кислотность почв сельскохозяйственных угодий Донецкой Народной Республики	
<i>Агурова И.В., Сыциков Д.В., Березовский А.С.</i> .....	137
Оценка микробного пула углерода в черноземе и дерново-подзолистой почве разных типов сельскохозяйственного землепользования методом люминесцентной микроскопии	
<i>Семенов М.В., Никитин Д.А., Леонов В.Д., Пинчук И.П., Тхакахова А.К., Ксенофонтова Н.А., Хитров Н.Б.</i> .....	156
Влияние тяжелых металлов на ферментативную активность почв природно-рекреационной зоны г. Перми (модельный опыт)	
<i>Сайранова П.Ш., Еремченко О.З.</i> .....	204
Влияние высокопористых биоуглей на свойства тепличных торфяных субстратов	
<i>Дрягина А.А., Пономарев К.О., Кремлева Т.А., Елина Е.И., Шулаев Н.А., Хайнак Л.М.</i> .....	230
Модель установления нормативов качества почв по содержанию нефтезагрязняющих веществ	
<i>Ковалева Е.И., Трофимов С.Я.</i> .....	270

## CONTENTS

Meadow soils on the Soil map of Russian Federation at a scale of 1 :2.5 million in the system of soil classification of Russia	
<i>Ananko T.V., Gerasimova M.I.</i> .....	5
Soil formation on derivatives of dense rocks of different composition in Transbaikalia	
<i>Gyninova A.B., Badmaev N.B., Kulikov A.I., Gyninova B.D., Mangataev A.Ts., Rampilov M.O.</i> .....	37
Peculiarities of remote sensing diagnostics of agrochemical properties of arable soils	
<i>Prudnikova E.Yu., Savin I.Yu., Windecker G.V., Vernyuk Yu.I., Rebouh N.Ya., Fomicheva N.V., Kaviza N.D.</i> .....	68
Features of soil cover structures of mining and industrial complexes in the Leningrad Oblast	
<i>Morgach Yu.R., Sukhacheva E.Yu.</i> .....	90
Landscape and positional substantiation of the withdrawal of fallow lands from agricultural use in Nonchernozem zone by the example of Kalininsky municipal district of Tver region	
<i>Ustimuk G.M., Lozbenev N.I.</i> .....	117
Assessment of the impact of various land use systems on soil acidity of agricultural lands in the Donetsk People's Republic	
<i>Agurova I.V., Syshchykov D.V., Berezovskyi A.S.</i> .....	137
Assessment of microbial carbon pool in chernozem and sod-podzolic soil of different types of agricultural land use by luminescence microscopy method	
<i>Semenov M.V., Nikitin D.A., Leonov V.D., Pinchuk I.P., Tkhhakhova A.K., Ksenofontova N.A., Khitrov N.B.</i> .....	156
The influence of heavy metals on the enzyme activity within the soils of the nature recreation zone in Perm	
<i>Sairanova P.Sh., Eremchenko O.Z.</i> .....	204
The effect of highly porous biochar on the properties of greenhouse peat substrates	
<i>Dryagina A.A., Ponomarev K.O., Kremleva T.A., Elina E.I., Shulaev N.A., Khainak L.M.</i> .....	230
The model for establishing soil quality standards for the content of oil contaminants	
<i>Kovaleva E.I., Trofimov S.Ya.</i> .....	270



**Ссылки для цитирования:**

Ананко Т.В., Герасимова М.И. Луговые почвы на Почвенной карте РСФСР масштаба 1 : 2.5 млн в системе классификации почв России // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2025. Вып. 126. С. 5-36. DOI: 10.19047/0136-1694-2025-126-5-36

**Cite this article as:**

Ananko T.V., Gerasimova M.I., Meadow soils on the Soil map of Russian Federation at a scale of 1 : 2.5 million in the system of soil classification of Russia, Dokuchaev Soil Bulletin, 2025, V. 126, pp. 5-36, DOI: 10.19047/0136-1694-2025-126-5-36

## Луговые почвы на Почвенной карте РСФСР масштаба 1 : 2.5 млн в системе классификации почв России

© 2025 г. Т. В. Ананко<sup>1\*</sup>, М. И. Герасимова<sup>1,2\*\*</sup>

<sup>1</sup>ФИЦ “Почвенный институт им. В.В. Докучаева”, Россия,  
119017, Москва, Пыжевский пер, 7, стр. 2,

\* <https://orcid.org/0000-0002-3218-6941>.

<sup>2</sup>МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия,

119991, Москва, Ленинские горы, 1,

\*\* <https://orcid.org/0000-0002-1815-4476>,

e-mail: [maria.i.gerasimova@gmail.com](mailto:maria.i.gerasimova@gmail.com).

Поступила в редакцию 23.12.2024, после доработки 24.01.2025,  
принята к публикации 13.11.2025

**Резюме:** В легенде Почвенной карты РСФСР масштаба 2.5 млн (ПКРФ) выделено пять единиц луговых почв. Их небольшие ареалы находятся во многих регионах России. Поиск корреляций между луговыми почвами исходной легенды ПКРФ и таксонами классификации почв России (КиДПР) проводился на основе сравнительного анализа факторов почвообразования, морфологических и аналитических характеристик разрезов луговых почв в литературных источниках в соответствии с их ареалами на карте. Единица легенды *Луговые дифференцированные почвы* имеет ограниченное распространение в пределах Ханкайско-Уссурийской и Средне-Амурской равнин. По материалам Г.И. Иванова

(1976), представлена в этих регионах пятью почвами, различающимися условиями почвообразования, свойствами и классификационным положением. Так, лугово-бурые отбеленные (луговые подбелы оподзоленные по классификации почв СССР, 1977) и луговые глеевые отбеленные почвы Ханкайско-Уссурийской равнины соответствуют в КиДПР подбелам темногумусовым глееватым криометаморфизованным и подбелам темногумусовым глеевым гумусово-криометаморфизованным. *Луговые глеевые оподзоленные и луговые глеевые осоложелые почвы*, формирующиеся в гидроморфных условиях молодых террас Ханкайско-Уссурийской равнины, коррелируют в КиДПР с перегнойно-дерново-глеевыми оподзоленными и темногумусово-глеевыми осоложелыми серегационно-карбонатными почвами соответственно. Лугово-бурые глеево-отбеленные почвы (луговые подбелы оподзоленно-глеевые по классификации почв СССР, 1977) Средне-Амурской равнины, предложенные в КиДПР (2008) в качестве аналогов подбелов темногумусовых глеевых, по совокупности диагностических свойств им не соответствуют и могут быть определены как *перегнойно-гумусово-глеевые оподзоленные темноязыковатые почвы*. Четыре единицы луговых недифференцированных почв легенды ПКРФ относятся к двум отделам КиДПР: органо-аккумулятивных и глеевых почв. Их гумусовые горизонты разнообразны: темногумусовые, перегнойно-темногумусовые (AUh), дерновые (AY), перегнойно-гумусовые (AH). Почвы крупных аллювиальных аласов Якутии характеризуются своеобразными темногумусовыми оторцованными карбонатными верхними горизонтами, оглеенностью, солонцеватостью и засолением профиля.

**Ключевые слова:** единицы легенды карты РФ; соответствие; разнообразие ареалов; луговые дифференцированные почвы; подбелы.

## Meadow soils on the Soil map of Russian Federation at a scale of 1 : 2.5 million in the system of soil classification of Russia

© 2025 T. V. Ananko<sup>1\*</sup>, M. I. Gerasimova<sup>2\*\*</sup>

<sup>1</sup>Federal Research Centre “V.V. Dokuchaev Soil Science Institute”,

7 Bld. 2 Pyzhevskiy per., Moscow 119017, Russian Federation,

\*<https://orcid.org/0000-0002-3218-6941>.

<sup>2</sup>Lomonosov Moscow State University,

1 Leninskie Gori, Moscow 119991, Russian Federation,

\*\*<https://orcid.org/0000-0002-1815-4476>,

e-mail: [maria.i.gerasimova@gmail.com](mailto:maria.i.gerasimova@gmail.com).

*Received 23.12.2024, Revised 24.01.2025, Accepted 13.11.2025*

**Abstract:** The legend of the Soil Map of the RSFSR at a scale of 1 : 2.5 million (SMRF) presents five units of meadow soils. Their small areas are located in many regions of Russia. The search for correlations between the meadow soils of the original legend of the SMRF and soils in the Classification System of Russian Soils (CSRS) was carried out on the basis of a comparative analysis of soil-forming factors, morphological and analytical characteristics of meadow soil profiles in publications, where soil pit locations coincide with their areas on the map. According to publications, the meadow differentiated soils of the Khanka-Ussuri and Middle-Amur Plains correspond to five different soils that differ in soil formation conditions, properties and classification position (Ivanov, 1976). Thus, meadow-brown bleached (meadow podbels podzolyzed according to the classification of soils of the USSR) and meadow-gley bleached soils of the Khanka-Ussuri Plain correspond in the CSRS to dark-humus gleyic cryometamorphosed podbels and dark-humus humus-cryometamorphosed gley podbels. Meadow-gley podzolyzed and meadow-gley solodic soils, formed under hydromorphic conditions on the young terraces of the Khanka-Ussuri Plain, correlate in the CSRS with humus-soddy-gley podzolyzed and dark-humus-gley solodic carbonate-segregationary soils. Meadow-brown gley-bleached soils (meadow podzolyzed-gley soils according to the USSR soil classification system, 1977) of the Middle-Amur Plain, proposed in the CSRS (2008) as analogues of dark-humus-gley podzolyzed soils, can be defined as mucky-humus-gley podzolyzed dark-tongue soils based on a combination of diagnostic properties. Meadow undifferentiated soils of the SMRF legend belong to two orders of the CSRS: organo-accumulative and gley soils. Their humus horizons are diverse: dark-humus, mucky-dark-humus (AUh), soddy (AY), mucky-humus (AH). Soils of large areas of Yakutia are characterized by unique carbonate peat-dark-humus upper horizons, they have also gleyic and solonetzic features, sometimes salinity in the profile.

**Keywords:** legend units of the map of Russian Federation; correlation; pedodiversity; meadow differentiated soils; podbels.

## ВВЕДЕНИЕ

В отделе генезиса, географии, классификации и цифровой картографии почв Почвенного института им. В.В. Докучаева ведется работа по созданию унифицированной цифровой модели почвенного покрова России с разрешением 500 м (УЦМ) (Савин и др., 2017; Жоголев, Савин, 2016; Zhogolev, Savin, 2020; Zhogolev, 2021). Работа основывается на легенде и содержании Почвенной

карты РСФСР масштаба 1 : 2.5 млн (Почвенная..., 1988 – далее ПКРФ; Единый Государственный..., 2014); единицы легенды УЦМ должны быть представлены в терминах и идеологии классификации почв России. В связи с этим возникла необходимость поиска корреляций между почвами исходной легенды карты и таксонами классификации почв России в двух ее версиях (КиДПР, 2004, 2008). В последней версии – “Полевом определителе почв России” – предложена в первом приближении корреляция почв классификаций почв СССР 1977 г. и КиДПР.

Перевод единиц легенды и содержания ПКРФ в формат КиДПР оказался очень разным по уровню сложности: от простого и однозначного в пределах всего ареала какой-либо почвы до поиска аналогов на основе анализа морфологических, физико-химических и химических свойств почв конкретных разрезов по региональным литературным и картографическим источникам с учетом факторов почвообразования. Сопоставление описаний почв, имеющихся в публикациях, с диагностическими критериями почв в КиДПР показало, что почвы – единицы легенды ПКРФ в разных частях их ареалов и/или на разных почвообразующих породах – интерпретируются по-разному. Такая работа по идентификации почв в КиДПР была проведена авторами раньше в отношении палевых почв, дерново-карбонатных, подзолисто-буроземных, таежных глеево-дифференцированных почв, группы горных, пойменных, а также арктических и тундровых почв исходной легенды (Ананко и др., 2015; Ананко и др., 2017; Конюшков и др., 2019; Ананко и др., 2024; Ананко и др., 2023; Ананко и др., 2018; Савицкая и др., 2021; Ананко и др., 2020). Данная работа дополняет эту серию и посвящена переводу в КиДПР пяти единиц луговых почв в легенде ПКРФ. Поиск аналогов луговых почв необходим даже с терминологической точки зрения, поскольку “ландшафтные” названия почв были исключены из базовой почвенной классификации, как не соответствующие ее принципам (Шишов, Соколов, 1989; Классификация..., 1997).

Название “луговые почвы” отражает их приуроченность к разнообразным травянистым фитоценозам лесостепной и степной зон в условиях повышенного увлажнения почвенно-грунтовыми водами разной степени минерализации. Луговые почвы встреча-

ются в подчиненных позициях рельефа или на ровных поверхностях с затрудненным дренажем, имеют темный гумусовый горизонт с высоким содержанием гумуса и признаки оглеения в нижней части профиля (Классификация..., 1977). Они показаны на ПКРФ небольшими ареалами во многих регионах, начиная от юга Центральной России до юга Дальнего Востока (рис. 1). К сожалению, информации о луговых почвах мало, и она содержится, главным образом, в статьях 1960–1980-х годов.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объект исследования – луговые почвы на Почвенной карте РСФСР 1988 г. В легенде карты они представлены пятью единицами, ареалы которых локальны (рис. 1). В статье не рассматриваются “луговые” варианты зональных почв (например, лугово-черноземные).



**Рис. 1.** Луговые почвы на Почвенной карте РСФСР 1988 г.  
**Fig. 1.** Meadow soils on the Soil map of the RSFSR, 1988.

Верификация имеющихся в Полевом определителе (2008) корреляций, географическая привязка и интерпретация почв в си-

стеме КиДПР проводились по общим характеристикам почв в разных публикациях, в основном путем анализа морфологических и аналитических свойств почв по отдельным конкретным разрезам, имеющимся в региональных монографиях, статьях и атласах. Разрезы выбирались максимально близко к полигонам ПКРФ по возможности с учетом почвообразующих пород; принимались во внимание условия почвообразования и информация на почвенных картах более крупного масштаба, чем 1 : 2.5 млн, в том числе на картах в региональных атласах. Описания разрезов анализировались с точки зрения выявления диагностических горизонтов и признаков, соответствующих критериям КиДПР; использовалась также информация о свойствах почв в Программе Почвенной карты, концептуально близкой классификации почв России (Программа..., 1972).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрим обоснование и результаты перевода пяти единиц легенды луговых почв, отображенных на ПКРФ, в формат классификации почв России и возникающие при этом сомнения и возможные варианты решений. Наиболее сложным оказался поиск аналогов луговых дифференцированных (в том числе осоледельных) почв ввиду неопределенности названия, следовательно, представлений об их генезисе.

*Луговые дифференцированные (в том числе осоледельные)* почвы выделены на ПКРФ исключительно на Дальнем Востоке, в пределах Ханкайско-Уссурийской и Средне-Амурской озерно-аллювиальных равнин (рис. 1). В Программе ПКРФ (1972) этой единицы легенды нет; луговые почвы с дифференцированным профилем A<sub>1</sub>-A<sub>2</sub>(A<sub>1</sub>A<sub>2</sub>)-Bt(g)-Bca(g)-Cg интерпретировались в ней как *осоледельные*. В более ранних и зонально ориентированных “Указаниях по классификации и диагностике почв” (1967) почвы дальневосточных равнин с дифференцированным профилем, оглеением и высоким содержанием гумуса были отнесены к *лугово-бурым оподзоленным и лугово-бурым оподзоленно-глеевым* в соответствии с их положением в зоне широколиственных лесов (табл. 1).

Вместе с тем еще в 1961 г. на равнинах юга Дальнего Восто-

ка под луговой растительностью Э.А. Корнблюом и Б.А. Зимовцом (1961) были описаны тяжелосуглинистые и глинистые почвы с осветленным горизонтом и текстурной дифференциацией профиля, названные *подбелами* луговыми. Авторы не отождествляли эти почвы ни с подзолистыми, ни с солодямыми. По их мнению, подзольообразование, как и осоложение, вряд ли может играть существенную роль в формировании дифференцированного профиля почв региона. Ряд специфических свойств почв: слабокислые и близкие к нейтральным значения рН, насыщенность основаниями, почти полное отсутствие выноса железа из осветленного горизонта и сегрегация его в конкреции, а также особая динамика процессов почвообразования, позволил авторам сделать выводы об индивидуальности этих почв, подчеркивая ее особым термином “*подбелы*”.

В дальнейшем термин “*подбелы луговые*” широко использовался разными авторами для выделения тяжелосуглинисто-глинистых дифференцированных почв озерно-аллювиальных равнин юга Дальнего Востока под луговой растительностью (Ливеровский, Росликова, 1962; Ливеровский, 1967; Росликова, Сохина, 1967) и вошел в классификацию почв СССР в качестве типа (Классификация..., 1977) с подразделением на два подтипа: *луговые подбелы оподзоленные* и *луговые подбелы оподзоленно-глеевые*, приуроченные, соответственно, к Ханкайско-Уссурийской и Средне-Амурской равнинам (табл. 1).

В названиях подтипов подчеркивалось наличие в этих почвах не только элювиально-глеевого отбеливания с сегрегацией железа в конкреции, но и процесса оподзоливания. Однако в региональной литературе *подбелы луговые* отделялись как от луговых *оподзоленных*, так и луговых *осолодельных* почв, формирующихся в других ландшафтных условиях, имеющих иные свойства, следовательно, занимающих разное классификационное положение (Иванов, 1976) (табл. 1). Отсюда возникло нейтральное, собирательное название луговых почв с осветленным горизонтом, принятое на ПКРФ, – *луговые дифференцированные* (в том числе *осолодельные*), включающее разные почвы с дифференцированным профилем под луговой растительностью.

**Таблица 1.** Аналоги луговых дифференцированных почв легенды ПКРФ в разных литературных источниках  
**Table1.** Analogues of meadow differentiated soils of the legend of the SMRF in publications

Указания к классификации..., 1967	Программа ПКРФ, 1972	Монография Г.И. Иванова, 1976	Классификация почв СССР, 1977	КиДПР, 2004, 2008
Лугово-бурые оподзоленные	Луговые осололедевые	Лугово-бурые отбеленные	Луговые подбелы оподзоленные	Подбелы темногумусовые
Лугово-бурые оподзоленно-глеевые		Лугово-бурые глеево-отбеленные	Луговые подбелы оподзоленно-глеевые	Подбелы темногумусовые глеевые
Луговые глеевые оподзоленные		Луговые глеевые отбеленные		
		Луговые глеевые оподзоленные		
		Луговые глеевые осололедевые		

Г.И. Ивановым (1976) были даны подробные характеристики пяти почв, соответствующих рассматриваемой единице легенды ПКРФ, описаны условия их образования (табл. 2).

В классификации почв России в отделе текстурно-дифференцированных почв есть два типа почв, близких по свойствам к луговым дифференцированным. В коррелятивной таблице с Классификацией почв СССР (Полевой..., 2008) предложены их аналоги: *подбелы темногумусовые – луговые подбелы оподзоленные* (по Г.И. Иванову – *лугово-бурые отбеленные*), и *подбелы темногумусовые глеевые – луговые подбелы оподзоленно-глеевые* (по Г.И. Иванову – *лугово-бурые глеево-отбеленные*). Для остальных луговых почв с дифференцированным профилем прямых корреляций с КиДПР не найдено (табл. 1). Поэтому в задачи исследования входила как верификация имеющихся в КиДПР почв, аналогичных луговым дифференцированным легендам ПКРФ, так и поиск аналогов для тех луговых дифференцированных почв, которые в ней отсутствуют, но описаны в региональной литературе.

Анализ диагностических свойств почв, близких рассматриваемой единице легенды, был основан на данных по 27 разрезам, заложенным на Ханкайско-Уссурийской и Средне-Амурской равнинах (Корнблюм, Зимовец, 1961; Ливеровский, Росликова, 1962; Хавкина, 1964; Иванов, 1976; Указания..., 1967; Герасимова, Росликова, 1985; Росликова и др., 2010).

Свойства луговых дифференцированных почв рассмотрим по двум ареаламна ПКРФ.

### **Приморский ареал (Ханкайско-Уссурийская равнина)**

*Лугово-бурые отбеленные почвы*, приуроченные к средне-четвертичным *озерно-аллювиальным террасам*, по сравнению с другими почвами, соответствующими рассматриваемой единице легенды, формируются в условиях лучшей дренированности, без участия грунтовых вод, но часто с верховодкой на глубине 0.5–1 м (табл. 2). В КиДПР они скоррелированы с *подбелами темногумусовыми*, профиль которых имеет строение: AU-ELnn-BEL-BT-C.

**Таблица 2.** Факторы почвообразования в ареалах луговых дифференцированных почв озерно-аллювиальных равнин юга Дальнего Востока и типы их водного режима

**Table 2.** Soil-forming factors in the areas of meadow differentiated soils of the lacustrine-alluvial plains in the south of the Far East and types of their water regime

Почвы по Г.И. Иванову (1976)	Породы. Рельеф. Гранулометрический состав	Растительность	Водный режим почв
*Лугово-бурые отбеленные	Среднечетвертичные озерно-аллювиальные; волнистый; тяжелосуглинисто-глинистый	Суходольные злаково-разнотравные остепненные слуга	Промывной периодически-застойный
*Луговые глеевые отбеленные	Верхнечетвертичные озерно-аллювиальные; плоский с блюдцеобразными депрессиями и неглубокими ложбинами; тяжелосуглинисто-глинистый	Разнотравно-злаковые луга	Длительно-застойный с близким залеганием уровня грунтовых вод
*Луговые глеевые оподзоленные		Осоково-вейниковые луга	
*Луговые глеевые осоладельные		Разнотравно-осоково-вейниковые луга	
**Лугово-бурые глеево-отбеленные	Среднечетвертичные озерно-аллювиальные; пологоволнистый, склоны; тяжелосуглинисто-глинистый	Осоково-вейниковые луга с березовым ерником и группами деревьев	Длительно-застойный

**Примечание.** \*Почвы Ханкайско-Уссурийской равнины; \*\*почвы Средне-Амурской равнины.

**Note.** \*Soils of the Khanka-Ussuri Plain; \*\*soils of the Middle Amur Plain.

Анализ свойств 11 разрезов лугово-бурых отбеленных почв (табл. 3) показал следующее: гумусовые горизонты ( $A_1$ ), в верхней части с уплотненной дерниной, по основным диагностическим

показателям (серый или темно-серый цвет, комковатая структура,  $\text{рН}_{\text{водн.}} 6\text{--}7$ , содержание гумуса 5–8%, Сгк/Сфк > 1, высокая степень насыщенности) близки диагностическим критериям темногумусового горизонта AU.

Осветленные горизонты ( $A_2$ ) светло-серые или пепельные, слоисто-листоватые, тяжелосуглинистые, со слабыми признаками оглеения, количеством конкреций 8–13% от веса почвы и содержанием в них железа 35–50% от общего его количества в мелкоземе, примерно соответствуют диагностическим критериям конкреционно-отбеленного горизонта ELnn.

Среди морфологических особенностей горизонтов BT – сизовато-бурый или сизовато-серый цвет, обусловленный с одной стороны оглеением, с другой – цветом почвообразующей породы – озерно-аллювиальных глин. Текстурная дифференциация профиля четко выражена ( $\text{КД} > 2$ ) и формируется преимущественно почвенными процессами (Иванов, 1976; Ливеровский, Росликова, 1962). В отличие от классической многопорядковой ореховато-призматической структуры горизонта BT и (пылевато-)глинистых кутан на гранях агрегатов, в большинстве разрезов структура определяется как зернисто-дробовидная, мелкокомковато-острореберная, угловато-комковатая, т. е. близкая к структуре метаморфических горизонтов. Ранее было показано, что формирование дробовидной, икринистой или угловато-крупнитчатой структуры в приамурских глинисто-дифференцированных луговых почвах связано с режимами протекания процессов промерзания/оттаивания (Гынинова и др., 2008, 2024).

Таким образом, при сочетании текстурной дифференциации профиля с элементами криометаморфической структуры срединного горизонта, высоким содержанием конкреций и почти полным отсутствием выноса железа из осветленного горизонта, глееватостью минеральной части профиля, рассматриваемые почвы определены в терминах КиДПР на уровне сложного подтипа как *подбелы темногумусовые глееватые* с вероятным подтиповым признаком *криометаморфизованные*. Профиль имеет строение: AUrg-AU-ELnn,g-BTg,(crm)-BCg-Cg; родовой признак **rz** – дернинный в названии почвы опускается.

**Таблица 3.** Сравнение диагностических свойств подбелов темногумусовых и подбелов темногумусовых глеевых КиДПР со свойствами лугово-бурых отбеленных и луговых глеевых отбеленных почв Ханкайско-Уссурийской равнины по описаниям Г.И. Иванова (1976) с дополнениями других авторов

**Table 3.** Comparison of the diagnostic properties of the dark-humus and dark-humus gley podbels with those of meadow-brown bleached and meadow-gley bleached soils of the Khanka-Ussuri Plain according to the descriptions of G.I. Ivanov (1976) and of other authors

Диагностические свойства подбелов темногумусовых, в т. ч. глеевых	Диагностические свойства	
	Лугово-бурые отбеленные	Луговые глеевые отбеленные
Диагностические признаки темногумусового горизонта	Гумусовый горизонт ( $A_0A_1+A_1$ ) темно-серый, комковатый, $pH_{\text{водн.}} 5.5-6$ , насыщенность 95–100%, содержание гумуса 5–8%, $C_{\text{гк}}/C_{\text{фк}} > 1$	Гумусовый горизонт ( $A_0A_1+A_1$ ) черно-бурый, темно-серый, комковатый, $pH_{\text{водн.}} 5.5-6.5$ , насыщенность 90%, содержание гумуса 5–12%, $C_{\text{гк}}/C_{\text{фк}} > 1$
Обилие крупных (более 3 мм в диаметре) конкреций в гор. ELnn	Много мелких точечных конкреций в гор. $A_2$	Есть точечные конкреции в гор. $A_2$
Количество конкреций в гор. ELnn составляет до 10–20% от веса почвы	Количество конкреций в гор. $A_2$ составляет 8–13% от веса почвы	Количество конкреций в гор. $A_2$ составляет 4–5% от веса почвы
Содержание железа в конкрециях в гор. ELnn больше 50%	Содержание железа в конкрециях в гор. $A_1+A_2$ – 35–45%	Содержание железа в конкрециях в гор. $A_1+A_2$ – 30–40%

### Продолжение таблицы 3

Table 3 continued

Диагностические свойства подбелов темногумусовых, в т. ч. глеевых	Диагностические свойства	
	Лугово-бурые отбеленные	Луговые глеевые отбеленные
Бурый и коричневато-бурый цвет гор. BT. В глеевых типах мраморовидная окраска гор. BTg. Ниже оглеенные гор-ты G и CG	Серовато- или сизовато-бурый, сизовато-серый цвет гор. Bt	Сизо-черный, черный, сизо-темно-серая, темно-шоколадный цвет гор. Bt. Ниже сизые, сизо-охристые гор-ты B <sub>2</sub> G и CG
Структура гор. BT ореховатая с призмовидностью многопорядковая. В глеевых типах – плитчато-острореберная	Угловато-комковатая, мелкокомковато-острореберная, зернисто-дробовидная, ореховатая,творожистая структура гор. Bt*	Икрянистая, дробовидная структура гор. Bt**
Многослойные пылевато-гумусово-глинистые кутаны в гор. BT, часто перекрываются скелетанами	Тонкие гелевидные пленки (Корнблюм, Зимовец, 1961); белесая присыпка по граням структурных отдельностей (Иванов, 1976); гумусово-глинистые и глинистые кутаны (Герасимова, Росликова, 1985)	Темные иловатые органо-минеральные пленки, темные марганцевые пленки по граням структурных отдельностей (Иванов, 1976; Росликова и др., 2010).
Глубокие криогенные трещины с гумусовыми языками	Отсутствуют	Отсутствуют

Под таким названием они введены в обновленную БД УЦМ в соответствующих полигонах луговых дифференцированных почв.

Следующие три луговые дифференцированные почвы, формирующиеся на самых молодых верхнечетвертичных озерно-аллювиальных террасах Ханкайско-Уссурийской равнины, относятся к гидроморфным и характеризуются длительно-застойным водным режимом с близкими грунтовыми водами (табл. 1).

***Луговые глеевые отбеленные почвы*** приурочены к относительно повышенным участкам со злаково-разнотравной растительностью (табл. 2). Они имеют сложное строение профиля, в котором сочетаются разные элементы. От рассмотренных выше лугово-бурых отбеленных почв морфологически отличаются черными, сизовато-черными или темно-шоколадными с глянцевым блеском срединными горизонтами Bt, структура которых описывается как икрянистая или дробовидная. На поверхности структурных отдельностей хорошо выражена темная органоминеральная пленка, которая и придает горизонту почти черный цвет. Количество конкреций в осветленном горизонте значительно меньше, чем в лугово-бурых отбеленных почвах, как и содержание в них железа (табл. 3). Характерна сильная оглеенность нижней части профиля. Гумусовые горизонты, часто с развитой дерниной (признак *rz*), по основным диагностическим свойствам определяются как темногумусовые, но за счет повышенного увлажнения с тем или иным участием хорошо разложенных растительных остатков, имеют черты перегнойного горизонта. В осветленных горизонтах EL переувлажнение ограничивает сегрегацию железа в конкреции (Иванов, 1976). Преимущественно икрянистая или дробовидная структура срединных горизонтов, их черный или темно-серый цвет, характер кутан близки к диагностике горизонта CRH (Полевой..., 2008), характерного для черноземовидных почв “амурских прерий”. Вероятно, аналогичные горизонты могут формироваться и в других почвах юга Дальнего Востока на озерно-аллювиальных отложениях тяжелого гранулометрического состава, в определенных условиях увлажнения, режима промерзания/оттаивания и достаточного количества в поч-

вах гумуса и железа. Строение профиля рассматриваемых почв будет: (AUhrz)-AU(h)-ELg-CRHg,td-BG-CG, и они могут быть классифицированы как (*перегнойно*)-темногумусово-элювиально-гумусово-криометаморфизованные глеевые, но такие почвы отсутствуют в КиДПР.

Вместе с тем в работе А.Б. Гыниновой с соавторами (2024) подобные темные иллювиально-метаморфические горизонты с криогенной структурой в луговых подбелах Приамурья предложено характеризовать только дополнительным подтиповым признаком *сгн* и относить к гумусово-криометаморфизованным. Учитывая приоритет текстурной дифференциации профиля, рассматриваемые почвы могут быть определены по КиДПР как *подбели (*перегнойно*)-темногумусовые глеевые гумусово-криометаморфизованные* (Полевой..., 2008). С таким сложным названием луговые дифференцированные почвы ареала на озерно-аллювиальных верхнечетвертичных террасах внесены в обновленную БД УЦМ.

В подчиненных позициях рельефа при дополнительном увлажнении под осоково-вейниковыми лугами формируются *луговые глеевые оподзоленные почвы* (Иванов, 1976). Они характеризуются гумусовым горизонтом, представляющим собой плотную черную дернину небольшой мощности с большим количеством полуразложившихся растительных остатков и содержанием гумуса 9–12% с резким его падением с глубиной, а также высокой долей в ППК поглощенного водорода (20–30%). Горизонт диагностируется по КиДПР как *перегнойно-дерновый дернинный AYh,rz*. В осветленном горизонте конкреции отсутствуют; срединный горизонт плотный, иловатый, вязкий, слабо оструктурен. По тем немногим описаниям, которыми мы располагали, строение профиля этих почв по КиДПР будет *AYh,rz-Gel-Gtd-CG*, и они будут относиться к *перегнойно-дерново-глеевым оподзоленным* (Полевой определитель..., 2008, С. 61).

К группе луговых дифференцированных почв легенды ПКРФ относятся также *луговые глеевые осоледелые почвы*, приуроченные к слабо выраженным извилистым ложбинам с разнотравно-осоково-вейниковыми лугами и неглубоким уровнем грунтовых вод. Наиболее характерными чертами этих почв являются: сильное оглеение средней и нижней частей профиля, наличие в

глеевом горизонте карбонатных конкреций разной формы и величины, икрянисто-дробовидная, икрянисто-творожистая, или угловато-дробовидная структура срединных горизонтов. Признаки осолождения проявляются также в щелочной реакции нижних горизонтов и участии в ППК обменного натрия (Иванов, 1976; Росликова и др., 1985, 2010). По КиДПР строение профиля этих почв будет AU-Gel-Gtd,nc,crm, и они относятся к *темногумусово-глеевым осоложденным сегрегационно-карбонатным криометаморфизованным*.

### **Приамурский ареал (Средне-Амурская равнина)**

*Лугово-бурые глеево-отбеленные почвы* в терминологии Г.И. Иванова (луговые подбелы оподзоленно-глеевые по Классификации..., 1977) описаны на Средне-Амурской равнине под осоково-вейниковыми лугами с участием берескового ериника, осиново-березовых редколесий и дуба. В коррелятивной таблице (Полевой..., 2008) они рассматриваются в качестве аналогов подбелов темногумусовых глеевых. Проведенное сравнение морфологических и физико-химических свойств двух разрезов подобных почв в Еврейской автономной области с диагностикой подбелов темногумусовых глеевых показал их отличия: гумусовый горизонт (темно-серый, иловатый, комковатый с большим количеством полуразложившихся растительных остатков, содержащий 10–20%, гумуса, в котором отношение Сгк/Сfk ≤ 1), диагностируется не как темногумусовый, он ближе к *перегнойно-гумусовому АН*. Содержание конкреций в оглеенном горизонте незначительное, или они отсутствуют. Иллювиальный, сильно оглеенный горизонт, имеет плитчато-остроребристую или зернисто-творожистую структуру. Почвы слабокислые ( $pH_{\text{водн.}} 5.6$ ;  $pH_{\text{сол.}} 4.8$ ), насыщенные. Отмечается наличие глубоких морозобойных трещин, заполненных гумусированным мелкоземом. Малое количество данных ограничивает возможности интерпретации почв в системе КиДПР; в первом приближении по совокупности свойств почвы могут быть отнесены к *перегнойно-гумусово-глеевым оподзоленным темноязыковатым* с возможным подтиповым признаком *криометаморфизованные*. Строение профиля: АН-EIG-BGyu(crm)-CG.

Результаты перевода единицы исходной легенды ПКРФ “лу-

говые дифференцированные, в том числе осолоделые” в разных ее ареалах на ПКРФ в номенклатуру КиДПР обновленной легенды для УЦМ-500 представлены в таблице 4.

**Таблица 4.** Луговые дифференцированные почвы в старой номенклатуре и в обновленной легенде ПКРФ в системе КиДПР

**Table 4.** Meadow differentiated soils in the old nomenclature and in the updated legend of the SMRF in the Russian soil classification system

Луговые дифференцированные (в т. ч. осолоделые) почвы по Г.И. Иванову и Классификации почв СССР (1977)	Луговые дифференцированные (в т. ч. осолоделые) почвы в системе КиДПР
Лугово-бурые отбеленные (подбелы луговые оподзоленные)	Подбелы темногумусовые глееватые криометаморфизованные
Луговые глеевые отбеленные	Подбелы (перегнойно)-темногумусовые глеевые гумусово-криометаморфизованные
Луговые глеевые оподзоленные	Перегнойно-дерново-глеевые оподзоленные
Луговые глеевые осолоделые	Темногумусово-глеевые осолоделые сегрегационно-карбонатные криометаморфизованные
Лугово-бурые глеово-отбеленные (подбелы луговые оподзоленно-глеевые)	Перегнойно-гумусово-глеевые оподзоленные темноязыковатые (криометаморфизованные)

### Луговые недифференцированные почвы

Результаты перевода четырех единиц луговых недифференцированных почв представлены в таблице (табл. 5). По сравнению с рассмотренными выше почвами, перевод этих единиц легенды был значительно проще, что объясняется относительно простым строением почвенных профилей, лучшей изученностью почв и их

более определенным положением в ландшафте: подчиненные позиции в разных природных зонах.

Некоторое исключение представляет единица легенды – “*луговые почвы (без разделения)*”, ареалы которой показаны на ПКРФ очень широко: от Западной Сибири до Дальнего Востока (рис. 1; табл. 5).

При поиске аналогов луговых недифференцированных почв мы опирались на описания конкретных разрезов в тех регионах, где они показаны на ПКРФ (Почвы Новосибирской..., 1966; Атлас Тюменской области, 1971; Уфимцева, 1967, 1974; Иванов, 1976; Росликова и др., 2010; Цыбжитов, 1971, 2006; Кузьмин, 1966, 1990; Воробьева, 2009; Надеждин, 1961; Еловская, 1987; Десяткин, 2010; Атлас сельского..., 1989).

В результате для разных регионов были подобраны более или менее соответствующие им аналоги в зависимости от климатических условий, характера рельефа, почвообразующих пород, дополнительного поверхностного или грунтового увлажнения (табл. 5).

Так, луговые почвы Западно-Сибирского региона отнесены к *темногумусовым глееватым* с возможными дополнительными подтиповыми признаками *метаморфизованные и потечно-гумусовые*. Луговые почвы Дальневосточного региона в зависимости от ареала, положения в рельефе, уровня почвенно-грунтовых вод относятся к *глееватым и глеевым*, а их гумусовые горизонты изменяются от *темногумусовых до перегнойно-темногумусовых AUh и перегнойно-гумусовых AH*. В некоторых разрезах отмечается комковато-остроребристая структура срединных горизонтов (Иванов, 1976), что может быть отражено подтиповым признаком *криометаморфизованные*. Для Забайкальского региона характерны *дерновые глеевые почвы*, формирующиеся на легких породах, подстилаемых песками и галькой, а в Предбайкалье луговые почвы, в переувлажнении которых большая роль принадлежит длительной сезонной мерзлоте, коррелируют с *темногумусовыми глееватыми почвами* с высокой задернованностью верхней части гумусового горизонта.

**Таблица 5.** Луговые недифференцированные почвы в старой номенклатуре и в обновленной легенде ПКРФ в системе КидПР

**Table 5.** Meadow undifferentiated soils in the old nomenclature and in the updated legend of the SMRF in the Russian classification system

Название единиц легенды луговых почв на ПКРФ	Ареалы	Название единиц легенды почв по КидПР
Луговые (без разделения)	Западно-Сибирский  Дальневосточный  Забайкальский  Предбайкальский  Якутский	1. Темногумусовые глеевые, в т. ч. потечно-гумусовые и метаморфизованные  2. Темногумусовые глеевые 2а. Перегнойно-темногумусово-глеевые 2б. Перегнойно-гумусово-глеевые темноязыковатые 3. Серогумусовые глеевые  4. Темногумусовые глеевые  5. Темногумусовые, в т. ч. оторфованные, глеевые, в т. ч. солонцеватые и засоленные, перегнойные и торфянистые глеевые и глеевые, в т. ч. солонцеватые и засоленные, солонцы, солончаки 5а. Темногумусовые глеевые, перегнойные глеевые и глеевые почвы, в т. ч. засоленные

**Продолжение 5**  
**Table 5 continued**

Название единиц легенды луговых почв на ПКРФ	Ареалы	Название единиц легенды почв по КидПР
Луговые карбонатные	Кавказский, Западно-Сибирский	Темногумусовые глеевые (квазиглеевые?) карбонатные
Луговые солонцеватые и солончаковатые	Западно-Сибирский	Темногумусовые глеевые солонцеватые и засоленные
Луговые слитые	Предкавказье	Отсутствуют

Значительный интерес представляют луговые почвы, выделенные на Центрально-Якутской равнине, полигоны которых совпадают либо с крупными аласами, либо с долинами малых рек. На почвенных картах Якутии (Атлас ЯАССР, 1989; листы ГПК: Р-52 “Якутск”, 1988; Р-50 “Сунтар”, 2002) аласы показаны мелкоконтурными сочетаниями мерзлотных лугово-черноземных и черноземно-луговых, в том числе засоленных и солонцеватых почв, солонцов, солончаков, перегнойно-глеевых почв и сапропелей. На ПКРФ контуры аласов представлены лишь одной почвой *луговые (без разделения)*. В обновленную БД для УЦМ было решенонести несколько аласных луговых почв, соответствующих трем поясам их кольцевой структуры: под влажными лугами избыточного увлажнения, настоящими лугами нормального увлажнения и оstepненными лугами недостаточного увлажнения (Зольников и др., 1962; Еловская, 1986; Десяткин, 2010). К общим диагностическим свойствам всех аласных луговых почв относятся: подстилание профиля многолетнемерзлыми льдистыми озерными отложениями с глубиной оттаивания от 50–70 см во влажно-луговых почвах, до 120–150 см – в оstepненных; наличие одного или нескольких погребенных горизонтов; присутствие в профиле карбонатов; нередко солонцеватость и засоление.

Анализ диагностических свойств аласных луговых почв из-

быточного увлажнения (взятые в анализ разрезы опубликованы в монографии Р.В. Десяткина) показал, что наиболее распространенными гумусовыми горизонтами для них являются перегнойные, а минеральные горизонты могут быть как глееватыми, так и глеевыми. Почвы вскипают с поверхности и часто содержат поглощенный натрий. По КиДПР их можно назвать *перегнойными глееватыми или глеевыми карбонатными мерзлотными, в том числе солонцеватыми и засоленными*. Для гумусовых горизонтов алассных почв нормального увлажнения характерны: неоднородная окраска (темно-бурая или серая с темными полосами и пятнами), порошко-комковатая структура, нейтральная до щелочной реакция, насыщенность основаниями, карбонатность. Содержание гумуса превышает 5%, при наличии оторфованных прослоек 12–18% (ППП). Признаки оглеения выражены отчетливо в сизоватых оттенках окраски и ржавых и сизых пятнах уже в верхней и средней частях профиля, и почвы могут быть определены по КиДПР как *темногумусовые или темногумусовые оторфованные глеевые карбонатные мерзлотные, преимущественно солонцеватые и засоленные с профилем: AU(ot, ca, g)-ACca,g(sn,s)-Cca,g.*

В наименее увлажненных аласах (остепненных по Р.В. Десятину) слабые признаки оглеения отмечаются только в нижней части профиля, засоление слабое или отсутствует. Содержание гумуса в верхнем горизонте преимущественно около 5%, при оторфованности возрастает до 10%. По КиДПР такие почвы можно назвать *темногумусовыми глееватыми мерзлотными, в том числе солонцеватыми*. В итоге в состав полигонов обновленной БД ПКРФ, совпадающих с аласами центральной части озерно-аллювиальной равнины, входят *темногумусовые глеевые карбонатные мерзлотные, в том числе оторфованные почвы, преимущественно солонцеватые и засоленные, перегнойные глеевые и глеевые мерзлотные почвы, в том числе солонцеватые и засоленные, солонцы и солончаки*.

Полигоны второго якутского ареала луговых почв – долины малых рек, впадающих в Лену южнее устья Вилюя. На почвенных картах Якутии они показаны как мелкоконтурные сочетания, включающие дерново-луговые глеевые и глеевые, лугово-болотные и болотно-низинные почвы. По материалам Л.Г. Елов-

ской (1987), дерново-луговые глеевые и глеевые почвы долин отличаются от аналогичных почв аллювий большей мощностью верхнего горизонта и содержанием в нем и нижележащем горизонте 8–12% гумуса, отсутствием карбонатов. Глеевый горизонт выражен слабо, и почвы относятся по КидПР к (*перегнойно-*)*темногумусовым глееватым*. По остальным трем единицам легенды были приняты более простые решения.

### ***Луговые солонцеватые и засоленные почвы***

Показаны на ПКРФ в лесостепной и степной зонах Западной Сибири, переведены по КидПР в *темногумусовые глеевые солонцеватые и засоленные*.

### ***Луговые карбонатные почвы***

Показаны на ПКРФ преобладающими в полигонах компонентами на двух низких равнинах, примыкающих к долине Терека, и вторым компонентом – в Западной Сибири, в долине Чулым. В отсутствие разрезов, характеризующих эти почвы, мы воспользовались описанием их в Программе... (1972). Почвы вскипают с поверхности, или чуть глубже. Отмечается интенсивная карбонатная пропитка всего профиля при слабо выраженным горизонте карбонатной аккумуляции. По КидПР – формально отнесены к *темногумусовым глееватым карбонатным*.

### ***Луговые слитые почвы***

В период составления ПКРФ слитые почвы были слабо изучены, их диагностические признаки, кроме сложения, в публикациях почти не обсуждались. В Предкавказье традиционно выделялись слитые черноземы на майкопских глинах, на других территориях небольшие ареалы слитизированных или слитых почв не были показаны на картах. Чтобы убедиться в источниках информации о луговых слитых почвах, были просмотрены почвенные карты Гипрозема масштаба 1 : 100 000 (Абинского района Краснодарского края, 1974; Адыгейской автономной области Краснодарского края, 1978; Северского района Краснодарского края, 1974), включающие этот контур и прилегающие территории. Ни на картах, ни в объяснительных записках к ним, ни луговые слитые, ни признаки слитизации в луговых почвах не упоминаются. Позднее

в России слитые почвы (*Vertisols* зарубежных авторов) детально исследовались Н.Б. Хитровым, в частности, на Кубано-Приазовской низменности. Однако на картах в его монографии (Хитров и др., 2020) ареалы слитоземов и слитизированных почв в данном полигоне ПКРФ не отмечены. На основании этих материалов единица легенды “*луговые слитые*” была исключена из данного полигона.

Таким образом, анализ свойств профилей луговых недифференцированных почв и поиск им аналогов в КиДПР показал, что они относятся преимущественно к отделу органо-аккумулятивных почв. По сравнению с почвами в легенде ПКРФ и в классификации почв СССР, их верхние горизонты оказываются разнообразнее, следовательно, рассматриваемые луговые почвы представлены несколькими типами. Как почвы условий повышенного увлажнения они различаются степенью оглеения: от глееватых до глеевых. Признаки оглеения выражены в профилях всех единиц легенды луговых почв в виде ржавых и сизых пятен на общем буром, сизовато-буром, сизовато-сером фоне, или буровато-сизом цвете горизонтов, что, однако, не дает пока достаточных оснований для разделения их на глеевые и квазиглеевые, глееватые и квазиглееватые.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Перевод пяти единиц луговых почв легенды ПКРФ в формат классификации почв России оказался простым и однозначным для почв с ясно выраженными признаками, дополнительными к их “*луговости*”, т. е. гумусонакоплению и оглеению. К ним относятся луговые солонцеватые и солончаковые, луговые слитые и луговые карбонатные, хотя возникли проблемы с их ареалами. Так, для луговых карбонатных почв не были найдены разрезы, подтверждающие свойства почв в тех регионах, где они имеются на карте (Северный Кавказ), поэтому перевод проводился формально на основании описания почв в Программе... (1972). Кроме того, по материалам Н.Б. Хитрова и на картах более крупного масштаба не подтвердилось наличие луговых слитых почв на низких террасах Кубани, поэтому они были исключены из актуализированной БД в данном полигоне.

Сложнее было найти аналоги двум другим единицам легенды: луговым дифференцированным (в том числе осолодельным) и луговым (без разделения) из-за неопределенности названий, т. е. генетической сущности, разброса и протяженности ареалов.

Перевод единицы легенды *луговые (без разделения)* с ее пятью ареалами в разных регионах России вызвал необходимость подбора аналогов с разными проявлениями поверхностного или грунтового переувлажнения – глееватых и глеевых почв. Среди гумусовых горизонтов в почвах этих пяти ареалов были диагностированы темногумусовые, перегнойно-темногумусовые, дерновые, темногумусовые карбонатные оторфованные.

Единице легенды *луговые дифференцированные (в том числе осолодельные)* соответствует не менее пяти почв с разными свойствами, условиями формирования и классификационным положением. Они могут быть выделены как типы и сложные подтипы по степени оглеения профиля, различиям в гумусовых горизонтах, выраженности элювиальных горизонтов и обилию в них конкретий, своеобразию срединных горизонтов, в которых обнаруживаются элементы криогенных структур, отмечаемые как криометаморфический или гумусово-криометаморфический признаки.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ананко Т.В., Герасимова М.И., Конюшков Д.Е. Палевые почвы Средней Сибири на бескарбонатных породах в Классификации почв России // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2015. Вып. 77. С. 29–50. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2015-77-29-50>.
2. Ананко Т.В., Конюшков Д.Е., Герасимова М.И. Палевые почвы с освещенным горизонтом на бескарбонатных породах в Классификации почв России // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2017. Вып. 87. С. 22–38. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2017-87-22-38>.
3. Ананко Т.В., Герасимова М.И., Конюшков Д.Е. Опыт обновления почвенной карты РСФСР масштаба 1 : 2.5 млн в системе классификации почв России // Почвоведение. 2017. № 12. С. 1411–1420. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0032180X17120024>.
4. Ананко Т.В., Герасимова М.И., Конюшков Д.Е. Почвы горных территорий в классификации почв России // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2018. Вып. 92. С. 122–146. DOI:

[https://doi.org/10.19047/0136-1694-2018-92-122-146.](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2018-92-122-146)

5. Ананко Т.В., Герасимова М.И., Конюшков Д.Е. Арктические и тундровые почвы на новой цифровой почвенной карте России масштаба 1 : 2.5 млн // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2020. Вып. 101. С. 46–75. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-101-46-75>.
6. Ананко Т.В., Герасимова М.И., Савицкая Н.В. Таежные глеево-дифференцированные почвы на почвенной карте РСФСР масштаба 1 : 2.5 млн в системе классификации почв России 2004 г. // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2022. Вып. 113. С. 5–30. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2022-113-5-30>.
7. Ананко Т.В., Герасимова М.И., Савицкая Н.В. Подзолисто-буровземные почвы Дальнего Востока на Почвенной карте РФ масштаба 1 : 2.5 млн и их корреляция с таксонами Классификации почв России // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2024. Вып. 118. С. 48–78. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2024-118-48-78>.
8. Атлас Тюменской области. Вып. 1. Москва–Тюмень: Изд-во ГУ Геодезии и Картографии при СМ СССР, 1971. 198 с.
9. Атлас Забайкалья. Бурятская АССР и Читинская область. М.: Ир-ск. ГУГК, 1967. С. 54–57.
10. Атлас сельского хозяйства Якутской АССР. М.: Изд-во ГУГК, 1989. 117 с.
11. Воробьева Г.А. Почвы Иркутской области: вопросы классификации, номенклатуры и корреляции. Иркутск: Изд-во Иркут. гос. ун-та, 2009. 149 с.
12. Герасимова М.И., Росликова В.И. Микроморфология луговых почв Приханкайской низменности // Почвоведение. 1985. № 1. С. 106–114.
13. Гынинова А.Б., Шоба С.А., Балсанова Л.Д. Влияние криогенных факторов на морфогенез луговых подбелов Приамурья // Вестник МГУ. Сер. почв. 2008. № 3. С. 10–14.
14. Гынинова А.Б., Герасимова М.И., Лебедева М.П. Криогенные признаки в микростроении луговых подбелов Среднеамурской низменности // Почвоведение. 2024. № 5. С. 655–664. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0032180X24050016>.
15. Десяткин Р.В. Почвообразование в термокарстовых котловинах – аласах криолитозлоны. Новосибирск: Наука, 2008. 300 с.
16. Единый Государственный Реестр Почвенных Ресурсов России. Версия 1.0. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2014. 768 с.
17. Жоголев А.В., Савин И.Ю. Автоматизированное обновление среднемасштабных почвенных карт // Почвоведение. 2016. № 11. С. 45–64. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0032180X16110125>.

18. Еловская Л.Г. Классификация и диагностика мерзлотных почв Якутии. Якутск, 1987. 172 с.
19. Зольников В.Г., Еловская Л.Г., Тетерина Л.В., Черняк Е.И. Почвы Виллюйского бассейна и их использование. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 204 с.
20. Иванов Г.И. Почвообразование на юге Дальнего Востока. М.: Наука, 1976. 199 с.
21. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
22. Классификация и диагностика почв СССР. М.: Колос, 1977. 123 с.
23. Конюшков Д.Е., Ананко Т.В., Герасимова М.И., Лебедева И.И. Актуализация содержания почвенной карты РСФСР масштаба 2.5 млн в формате классификации почв России для создания новой цифровой карты // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2020. Вып. 102. С. 21–48. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-102-21-48>.
24. Конюшков Д.Е., Герасимова М.И., Ананко Т.В. Корреляция дерново-карбонатных почв на Почвенной карте РСФСР масштаба 1 : 2.5 млн и в системе классификации почв России // Почвоведение. 2019. № 3. С. 276–289.
25. Корнблюм Э.А., Зимовец Б.А. Происхождение почв Приамурья с белесым горизонтом // Почвоведение. 1961. № 6. С. 55–66.
26. Кузьмин В.А. Объяснительная записка к листу N 48 “Иркутск”. М.: ВАСХНиЛ, Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 1990. 55 с.
27. Ливеровский Ю.А., Росликова В.И. О генезисе некоторых луговых почв Приморья // Почвоведение. 1962. № 8. С. 36–40.
28. Полевой определитель почв России. М.: Почв.ин-т им.В.В. Докучаева, 2008. 182 с.
29. Лист ГПК Р- 52 “Якутск”. М.: ГУГК. Составлен в Почвенном ин-те им. В.В. Докучаева, 1988.
30. Лист ГПК Р-50 “Сунтар”. М.: ГУГК. Составлен в Почвенном ин-те им. В.В.Докучаева, 2002.
31. Почвенная карта Якутии масштаба 1 : 5 млн // Атлас сельского хозяйства Якутской АССР. М.: ГУГК при СМ СССР, 1989. С. 30–31.
32. Почвенная карта Абинского района Краснодарского края. М.: Гипрозем, 1974.
33. Почвенная карта Адыгейской автономной области Краснодарского края. М.: Гипрозем, 1978.
34. Почвенная карта Северского района Краснодарского края. М.: Гипрозем. 1974.
35. Почвенная карта Центральной Якутии масштаба 1 : 2.5 млн. Атлас

- сельского хозяйства Якутской АССР. М.: ГУГК при СМ СССР, 1989. С. 32–33.
36. Почвенно-климатический Атлас Новосибирской области. Новосибирск: Наука, 1978. С. 56–61.
37. Почвенный покров и земельные ресурсы Российской Федерации. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2001. 399 с.
38. Почвы Новосибирской области / Под ред. Р.В. Ковалева // Новосибирск: Наука, 1966. 421 с.
39. Программа Почвенной карты СССР масштаба 1 : 2 500 000 / Ред. И.П. Герасимов, В.В. Егоров, В.М. Фриланд. М., 1972. 158 с.
40. Росликова В.И., Рыбачук Н.А., Короткий А.М. Атлас почв юга Дальнего Востока России. Приханкайская низменность. Владивосток: Дальнаука, 2010. 246 с.
41. Росликова В.И., Матюшкина Л.А. Текстурно-дифференцированные почвы равнин юга Дальнего Востока и их ландшафтно-географические особенности // Региональные проблемы. 2017. Т. 20. № 4. С. 53–60
42. Савин И.Ю., Герасимова М.И., Лебедева И.И., Ананко Т.В., Конюшков Д.Е., Белоусова Н.И., Королюк Т.В., Шубина И.Г., Хохлов С.Ф., Шишкионакова Е.А., Савицкая Н.В. О создании новой версии цифровой почвенной карты России масштаба 1 : 2.5 млн // Современные проблемы изучения почвенных и земельных ресурсов. Сборник докладов Второй Всероссийской открытой конференции с международным участием. 2017. С. 23–26.
43. Указания по классификации и диагностике почв. Почвы буроземно-лесных областей СССР. Вып. 11. Мин-во Сельского хозяйства СССР. Почв. ин-т им. В.В. Докучаева. М.: Колос. 63 с.
44. Шишов Л.Л., Соколов И.А. Генетическая классификация почв СССР // Почвоведение. 1989. № 4. С. 112–120.
45. Хитров Н.Б., Калинина Н.В., Роговнева Л.В., Рухович Д.И. Слитоземы и слитизированные почвы России. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2020. 515 с.
46. Цыбжистов Ц.Х. Почвы лесостепи Селенгинского среднегорья. Улан-Уде, 1971. 107с.
47. Цыбжистов Ц.Х., Б-М.Н. Гончиков. Почвы бассейна озера Байкал. Улан-Уде: Бурятск. ун-т, 2006. Т. 4. 201 с.
48. Zhogolev A., Savin I. Soil Mapping Based on Globally Optimal Decision Trees and Digital Imitations of Traditional Approaches // ISPRS International Journal of Geo-Information. 2020. Vol. 9. No. 11. P. 664. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijgi9110664>.
49. Zhogolev A.V. Soil Mapping Based on Globally Optimal Decision Trees // Pedometrics: WGs Digital Soil Mapping – Global Soil Map 2021.

Wageningen, 2021.

## REFERENCES

1. Ananko T.V., Gerasimova M.I., Konyushkov D.E., Pale soils on carbonate-free deposits in Central Siberia and their taxonomic position in the Soil Classification of Russia, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2015, Vol. 77, pp. 29–50, DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2015-77-29-50>.
2. Ananko T.V., Konyushkov D.E., Gerasimova M.I., Pale soils with a bleached horizon developing from carbonate-free rocks in the classification System of Russian Soils, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2017, Vol. 87, pp. 22–38, DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2017-87-22-38>.
3. Ananko T.V., Gerasimova M.I., Konyushkov D.E., Opyet obnovleniya pochvennoy karty RSFSR mashtaba 1 : 2.5 mln v sisteme klassifikatsii pochv Rossii (Experience of updating the soil map of the RSFSR at a scale of 1 : 2.5 million in the soil classification system of Russia), *Pochvovedenie*, 2017, No. 12, pp. 1411–1420, DOI: <https://doi.org/10.7868/S0032180X17120024>.
4. Ananko T.V., Gerasimova M.I., Konyushkov D.E., The soils of mountainous territories (in the Russian), *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2018, Vol. 92, pp. 122–146, DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2018-92-122-146>.
5. Ananko T.V., Gerasimova M.I., Konyushkov D.E., Arctic and tundra soils on the new digital soil map of Russia, 1 : 2.5 M scale, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2020, Vol. 101, pp. 46–75, DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-101-46-75>.
6. Ananko T.V., Gerasimova M.I., Savitskaya N.V., Floodplain soils on the soil map of the Russian Federation, scale 1 : 2.5 M, 1988, in the Russian soil classification, 2004, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2022, Vol. 113, pp. 5–30, DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2022-113-5-30>.
7. Ananko T.V., Gerasimova M.I., Savitskaya N.V., Podzolic-brown soils of the Far East on the Soil map of Russian Federation, scale 1 : 2.5 M, and their correlation with soils in the Russian soil classification, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2024, Vol. 118, pp. 48–78, DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2024-118-48-78>.
8. *Atlas of the Tyumen Region*, Iss. 1, Moscow–Tyumen: Izd-vo GU Geodezii i Kartografiipri SSSR, 1971, 198 p.
9. *Atlas of Transbaikalia. Buryat ASSR and Chita Oblast*, Moscow–Irkutsk: GUGK, 1967, pp. 54–57.
10. *Atlas of Agriculture of the Yakut ASSR*, Moscow: Izd-vo GU Geodezii I Kartografiipri SSSR, 1989, 117 p.
11. Vorobyeva G.A., *Pochvy Irkutskoy oblasti: voprosy klassifikatsii*,

- nomenklatury I korrelyatsii* (Soils of the Irkutsk region: classification, nomenclature, and correlation issues), Irkutsk: Izd-vo Irkut. gos. un-ta, 2009, 149 p.
12. Gerasimova M.I., Roslikova V.I., Mikromorfologiya lugovykh pochv Prikhankayskoy nizmennosti (Micromorphology of meadow soils of the Khanka Lowland), *Pochvovedenie*, 1985, No. 1, pp. 106–114.
13. Gyninova A.B., Shoba S.A., Balsanova L.D., Vliyanie kriogennykh faktorov na morfogenез lugovykh podbelov Priamur'ya (The influence of cryogenic factors on the morphogenesis of meadow undergrowths in the Amur Region), *Vestnik MGU, Ser. Pochv.*, 2008, No. 3, pp. 10–14.
14. Gyninova A.B., Gerasimova M.I., Lebedeva M.P., Kriogennyye priznaki v mikrostroyenii lugovykh podbelov Sredneamurskoy nizmennosti (Cryogenic features in the microstructure of meadow undergrowths of the Middle Amur Lowland), *Pochvovedenie*, 2024, No. 5, pp. 655–664, DOI: <https://doi.org/10.31857/S0032180X24050016>.
15. Desyatkin R.V., *Pochvoobrazovaniye v termokarstovyxh kotlovinakh – alasakh kriolitozony* (Soil formation in thermokarst basins – alases of permafrost zones), Novosibirsk: Nauka, 2008, 300 p.
16. *Unified State Register of Soil Resources of Russia*, Version 1.0, Moscow: V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, 2014, 768 p.
17. Zhogolev A.V., Savin I.Yu., Avtomatizirovannoe obnovlenie srednemasshtabnykh pochvennykh kart (Automated updating of medium-scale soil maps), *Pochvovedenie*, 2016, No. 11, pp. 45–64, DOI: <https://doi.org/10.7868/S0032180X16110125>.
18. Elovskaya L.G., *Klassifikatsiya i diagnostika merzlotnykh pochv Yakutii* (Classification and diagnostics of permafrost soils of Yakutia), Yakutsk, 1987, 172 p.
19. Zolnikov V.G., Elovskaya L.G., Teterina L.V., Chernyak E.I., *Pochvy Vilyuyskogo basseyna i ikh ispol'zovanie* (Soils of the Vilyui basin and their use), Moscow: Izd-vo AN SSSR, 1962, 204 p.
20. Ivanov G.I., *Pochvoobrazovanie na yuge Dal'nego Vostoka* (Soil formation in the south of the Far East), Moscow: Nauka, 1976, 199 p.
21. *Klassifikatsiya i diagnostika pochv Rossii* (Classification and diagnostics of soils of Russia), Smolensk: Oikumena, 2004, 342 p.
22. *Klassifikatsiya i diagnostika pochv SSSR* (Classification and diagnostics of soils of the USSR), Moscow: Kolos, 1977, 123 p.
23. Konyushkov D.E., Ananko T.V., Gerasimova M.I., Lebedeva I.I., Actualization of the contents of the soil map of Russian Federation (1 : 2.5 M scale) in the format of the classification system of Russian soils for the development of the new digital map of Russia, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2020, Vol. 102, pp. 21–48, DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-102-21>.

48.

24. Konyushkov D.E., Gerasimova M.I., Ananko T.V., Korrelatsiya dernovo-karbonatnykh pochv na Pochvennoy karte RSFSR masshtaba 1 : 2.5 mlni v sisteme klassifikatsii pochv Rossii (Correlation of soddy-camellar soils on the soil map of the RSFSR at a scale of 1 : 2.5 million and in the Soil Classification system of Russia), *Pochvovedenie*, 2019, No. 3, pp. 276–289.
25. Kornblum E.A., Zimovets B.A., Proiskhozhdenie pochv Priamur'ya s belesym gorizontom (Origin of soils with a whitish horizon in the Amur Region), *Pochvovedenie*, 1961, No. 6, pp. 55–66.
26. Kuz'min V.A., *Ob'yasnitel'naya zapiska k listu N 48 "Irkutsk"* (Explanatory note to map sheet No. 48 "Irkutsk"), Moscow: VASKhNIL, Pochv. in-t im. V.V. Dokuchaeva, 1990, 55 p.
27. Liverovskiy Yu.A., Roslikova V.I., O genezise nekotorykh lugovykh pochv Primor'ya (On the genesis of some meadow soils of Primorye), *Pochvovedenie*, 1962, No. 8, pp. 36–40.
28. *Polevoy opredelitel' pochv Rossii* (Field Guide to Soils of Russia), Moscow: V.V. Dokuchaev Soil Institute, 2008, 182 p.
29. Sheet of State Soil Map P-52 "Yakutsk", Moscow: GUGK, Compiled at the V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, 1988.
30. Sheet of State Soil Map P-50 "Suntar", Moscow: GUGK, Compiled at the V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, 2002.
31. Pochvennaya karta Yakutii masshtaba 1 : 5 mln (Soil map of Yakutia, scale 1 : 5 million), In: *Atlas sel'skogo khozyaystva Yakutskoy ASSR* (Atlas of agriculture of the Yakut ASSR), Moscow: GUGK pri SM SSSR, 1989, pp. 30–31.
32. *Pochvennaya karta Abinskogo rayona Krasnodarskogo Kraja* (Soil map of Abinsky District, Krasnodar Krai), Moscow: Giprozem, 1974.
33. *Pochvennaya karta Adygeyskoy avtonomnoy oblasti Krasnodarskogo Kraja* (Soil map of the Adyge Autonomous Region, Krasnodar Krai), Moscow: Giprozem, 1978.
34. *Pochvennaya karta Severskogo rayona Krasnodarskogo Kraja* (Soil map of Seversky District, Krasnodar Krai), Moscow: Giprozem, 1974.
35. *Pochvennaya karta Tsentral'noy Yakutii masshtaba 1 : 2.5 mln* (Soil map of Central Yakutia, scale 1 : 2.5 million), In: *Atlas sel'skogo khozyaystva Yakutskoy ASSR* (Atlas of agriculture of the Yakut ASSR), Moscow: GUGK pri SM SSSR, 1989, pp. 32–33.
36. *Pochvenno-klimaticheskiy atlas Novosibirskoy oblasti* (Soil and climatic atlas of Novosibirsk Oblast), Novosibirsk: Nauka, 1978, pp. 56–61.
37. *Pochvennyi pokrov i zemel'nye resursy Rossiyskoy Federatsii* (Soil cover and land resources of the Russian Federation), Moscow: V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, 2001, 399 p.

38. Kovalyova R.V. (Ed.), *Pochvy Novosibirskoy oblasti* (Soils of the Novosibirsk Region), Novosibirsk: Nauka, 1966, 421 p.
39. Gerasimov I.P., Egorov V.V., Fridland V.M. (Eds), *Programma Pochvennoy karty SSSR mashtaba 1 : 2 500 000* (Program for the Soil Map of the USSR, scale 1 : 2,500,000), Moscow: 1972, 158 p.
40. Roslikova V.I., Rybachuk N.A., Korotkij A.M., *Atlas pochv yuga Dal'nego Vostoka Rossii. Prihankayskaya nizmennost'* (Atlas of soils of the Southern Russian Far East. Prihankayskaya Lowland), Vladivostok: Dal'nauka, 2010, 246 p.
41. Roslikova V.I., Matyushkina L.A., Teksturno-differencirovannye pochvy ravnin yuga Dal'nego Vostoka i ikh landshaftno-geograficheskie osobennosti (Texturally differentiated soils of the plains of the Southern Far East and their landscape-geographical features), *Regional'nye problemi*, 2017, Vol. 20, No. 4, pp. 53–60.
42. SavinI.Yu., Gerasimova M.I., Lebedeva I.I., Ananko T.V., Konyushkov D.E., Belousova N.I., Korolyuk T.V., Shubina I.G., Khokhlov S.F., Shishkonakova E.A., Savitskaya N.V., O sozdanii novoj versii cifrovoj pochvennoj karty Rossii mashtaba 1 : 2.5 mln (On the creation of a new version of a digital soil map of Russia at a scale of 1:2.5 million), Proc. the Second All-Russian open conference with international participation *Sovremennye problemi izucheniya pochvennyh i zemel'nykh resursov* (Modern problems of studying soil and land resources), 2017, pp. 23–26.
43. Ukaraniya po klassifikacii i diagnostike pochv. *Pochvy burozemno-lesnyh oblastej SSSR* (Guidelines for the classification and diagnostics of soils. Soils of brown soil-forest regions of the USSR. Issue 11. USSR Ministry of Agriculture. V.V. Dokuchaev Soil Science Institute), Moscow: Kolos, 63 p.
44. Shishov L.L., Sokolov I.A., Geneticheskaya klassifikaciya pochv SSSR (Genetic classification of soils of the USSR), *Pochvovedenie*, 1989, No. 4, pp. 112–120.
45. Khitrov N.B., Kalinina N.V., Rogovneva L.V., Ruhovich D.I., *Slitozemnye i slitizirovannye pochvy Rossii* (Slitozems and slitized soils of Russia), Mosow: Pochv. in-t im. V.V. Dokuchaeva, 2020, 515 p.
46. Tsybzhitov C.H., *Pochvy lesostepi Selenginskogo srednegor'ya* (Soils of the forest-steppe of the Selenginsk middle mountains), Ulan-Ude, 1971, 107.p.
47. Tsybzhitov C.H., Gonchikov B-M.N., *Pochvy bassejna ozera Bajkal* (Soils of the Lake Baikal basin), Ulan-Ude: Buryatsk. un-t., 2006, Vol. 4, 201 p.
48. Zhogolev A., Savin I., Soil mapping based on globally optimal decision trees and digital imitations of traditional approaches, *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2020, Vol. 9, No. 11, 664 p., DOI: <https://doi.org/10.3390/ijgi9110664>.
49. Zhogolev A.V., Soil mapping based on globally optimal decision trees,

Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2025. Вып. 125  
Dokuchaev Soil Bulletin, 2025, 125

*Pedometrics: WGs Digital Soil Mapping – Global Soil Map*, Wageningen,  
2021.



**Ссылки для цитирования:**

Гынинова А.Б., Бадмаев Н.Б., Куликов А.И., Гынинова Б.Д., Мангатаев А.Ц., Рампилов М.О. Почвообразование на дериватах плотных пород различного состава в Забайкалье // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2025. Вып. 126. С. 37-67.  
DOI: 10.19047/0136-1694-2025-126-37-67

**Cite this article as:**

Gyninova A.B., Badmaev N.B., Kulikov A.I., Gyninova B.D., Mangataev A.Ts., Rampilov M.O., Soil formation on derivatives of dense rocks of different composition in Transbaikalia, Dokuchaev Soil Bulletin, 2025, V. 126, pp. 37-67, DOI: 10.19047/0136-1694-2025-126-37-67

**Благодарность:**

Исследование выполнено при поддержке бюджетного финансирования по теме НИР: № 121030100228-4 ФГБУН Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН.

**Acknowledgments:**

The study was carried out with the support of budget funding for research topic: No. 121030100228-4 FSBSI ‘Institute of General and Experimental Biology’ of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

## Почвообразование на дериватах плотных пород различного состава в Забайкалье

© 2025 г. А. Б. Гынинова<sup>1\*</sup>, Н. Б. Бадмаев<sup>1\*\*\*</sup>, А. И. Куликов<sup>1</sup>,  
Б. Д. Гынинова<sup>1\*\*\*\*</sup>, А. Ц. Мангатаев<sup>1\*\*\*\*\*</sup>, М. О. Рампилов<sup>2\*\*\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН, Россия,  
670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6,

\*<https://orcid.org/0000-0001-7897-7848>, e-mail: [ayur.gyninova@mail.ru](mailto:ayur.gyninova@mail.ru),

\*\*<https://orcid.org/0000-0002-0451-6560>, e-mail: [nima\\_b@mail.ru](mailto:nima_b@mail.ru),

\*\*\*<https://orcid.org/0000-0002-4316-262X>, e-mail: [gbaira@gmail.com](mailto:gbaira@gmail.com),

\*\*\*\*<https://orcid.org/0000-0002-3646-3141>, e-mail: [aleksandr\\_man@mail.ru](mailto:aleksandr_man@mail.ru).

<sup>2</sup>Геологический институт им. Н.Л. Добрецова СО РАН, Россия,  
670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а,

\*\*\*\*\*<https://orcid.org/0000-0001-8059-1047>, e-mail: [mrampilov@mail.ru](mailto:mrampilov@mail.ru).

Поступила в редакцию 07.03.2025, после доработки 08.09.2025,  
принята к публикации 13.11.2025

**Резюме:** Исследованы почвы на дериватах плотных пород различного возраста, генезиса и состава в Забайкалье. Определены экологические ниши и классификационное положение почв. На фоне преобладающих в Забайкалье почв, сформированных на щебнисто-дрессияистых легких суглинках, супесях и песках – продуктах выветривания и переотложения широко развитых кислых магматических пород, выделяются почвы иного литологического состава, занимающие специфические экологические ниши. В статье рассмотрены три группы таких почв. В гумидных условиях, в зоне распространения многолетней мерзлоты, под лиственничной тайгой, на щебнисто-суглинистых дериватах метаморфических эфузивов, известняков, сланцев и песчаников кембрия формируется профиль криометаморфических грубогумусных оподзоленных почв мощностью > 1 м. Основными почвообразовательными процессами в них являются оглинивание, агрегирование, образование грубого гумуса, оподзоливание и иллимизерация. В условиях semiаридного климата, глубокого и длительного промерзания, в пределах пояса сухих сосняков, на продуктах выветривания биотитовых гранитов, гранодиоритов, сиенитов раннепалеозойских интрузий Витимканского комплекса, профиль почвы имеет мощность < 0.2 м. В почве получают развитие процессы опесчанивания, образования пылеватой фракции, заторможенной гумификации с образованием буровато-серого горизонта АY. Эти факторы и процессы приводят к формированию литоземов серогумусовых. В условиях аридного климата, глубокого и длительного промерзания в пределах криоаридного степного пояса, на продуктах выветривания трахибазальтов, субщелочных базальтов и плагиобазальтов юрского времени, в условиях развития процессов образования пылеватой фракции, опесчанивания, денудации, гумификации и образования каштанового с красноватым оттенком горизонта АК, образуются литоземы криогумусовые.

**Ключевые слова:** почвообразующая порода; метаморфизм почв; гумусообразование; диагностика почв; классификация почв.

## **Soil formation on derivatives of dense rocks of different composition in Transbaikalia**

© 2025 A. B. Gyninova<sup>1\*</sup>, N. B. Badmaev<sup>1\*\*\*</sup>, A. I. Kulikov<sup>1</sup>,  
B. D. Gyninova<sup>1\*\*\*\*</sup>, A. Ts. Mangataev<sup>1\*\*\*\*\*</sup>, M. O. Rampilov<sup>2\*\*\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>*Institute of General and Experimental Biology SB RAS,  
6 Sakhyanova Str., Ulan-Ude 670047, Russian Federation,*

\*<https://orcid.org/0000-0001-7897-7848>, e-mail: [ayur.gyninova@mail.ru](mailto:ayur.gyninova@mail.ru),

\*\*<https://orcid.org/0000-0002-0451-6560>, e-mail: [nima\\_b@mail.ru](mailto:nima_b@mail.ru),

\*\*\*<https://orcid.org/0000-0002-4316-262X>, e-mail: [gbaira@gmail.com](mailto:gbaira@gmail.com),

\*\*\*\*<https://orcid.org/0000-0002-3646-3141>, e-mail: [aleksandr\\_man@mail.ru](mailto:aleksandr_man@mail.ru).

<sup>2</sup>*Geological Institute named after. N.L. Dobretsov SB RAS,*

*6a Sakhyanova Str., Ulan-Ude 670047, Russian Federation,*

\*\*\*\*\*<https://orcid.org/0000-0001-8059-1047>, e-mail: [mrampilov@mail.ru](mailto:mrampilov@mail.ru).

Received 07.03.2025, Revised 08.09.2025, Accepted 13.11.2025

**Abstract:** The soils on the eluvium of dense rocks of different ages, genesis and composition were studied in Transbaikalia. The ecological niches of the soils and their classification position were determined. Under humid conditions, in the permafrost zone under the larch taiga on the rubble-loamy derivatives of metamorphic effusive rocks, limestones, shales, and sandstones of the Cambrian, the profile of cryometamorphic coarse-humus podzolized soils are formed with a thickness of more than 1 m. The main pedogenic processes are claying, aggregation, coarse humus forming, podzolization and illimerization. Under the conditions of a semi-arid climate, deep and prolonged freezing, within the belt of dry pine forests, on the products of weathering of biotite granites, granodiorites, syenites of the early Paleozoic intrusions of the Vitimkan complex, the soil profile has a thickness of less than 0.2 m. The processes of sandification, siltization, inhibited humification with the formation of a brownish-gray horizon AY are developed in the soil. These factors and processes lead to the gray-humus lithozems forming. Under the arid climate conditions, deep and prolonged freezing within the cryoarid steppe belt, cryohumus lithozems are formed on the products of weathering of trachybasalts, subalkaline basalts and plagiobasalts of the Jurassic period, with the processes of siltization, sandification, denudation, humification, and the formation of a chestnut horizon AK of the reddish tone.

**Keywords:** soil-forming rock; soil metamorphism; humus formation; soil diagnostics; soil classification.

## ВВЕДЕНИЕ

На современном этапе развития генетического почвоведения большое внимание уделяется особенностям почвообразующих пород (Градусов, 2005). Согласно И.А. Соколову (1973, 1997), С.В. Горячкому и др. (2008), С.В. Горячкому (2010) при исследо-

вании географии почв следует опираться не только на биоклиматогенные факторы, но и на геогенные. В Байкальском регионе это направление получило развитие в работах Л.Д. Балсановой, А.Б. Гыниновой (2015); Почвы... (2015); В.Л. Убугунова, В.И. Убугуновой (2017); А.Б. Гыниновой, Н.Б. Бадмаева (2021); Н.Б. Бадмаева, А.Б. Гыниновой (2021).

Согласно Н.А. Ногиной (1964) в Забайкалье в связи с горнокотловинным рельефом и геологической историей почвообразующие породы в основном представлены элювием, элюво-делювием, пролюво-делювием и делювием гранитоидов, среди которых доминируют песчано-пылеватые легкие суглинки и супеси, в верхней части склонов – щебнистые и дресвянистые. Причиной грубодисперсности элювия и материала, накопившегося в процессе денудации, считается доминирование физического выветривания, обусловленное резкой континентальностью климата. Однако в Забайкалье описаны почвы, как равнинные, так и горные, которые имеют средне- и тяжелосуглинистый гранулометрический состав. Они приурочены либо к территориям с более мягким климатом: Прибайкалью (Цыбжитов, 2000; Цыбжитов и др., 1992; Убугунова и др., 1985; Балсанова, 2022), либо к горным территориям с коренными с почвообразующими породами, представленными продуктами выветривания глинистых сланцев (Вторушин, 1982), или на многолетнемерзлых породах (ММП) (Дугаров, Куликов, 1990; Почвы..., 2015; Gyninova et al., 2021; Гынинова, Бадмаев, 2021).

Причиной различий гранулометрического состава почвообразующих пород и почв является различие в выветривании, фоновой функцией которого является образование новой почвообразующей породы (Фридланд, 1955; Таргульян, 1971; Соколов, 1978; Белоусова, 2006). Различия в выветривании плотных пород в свою очередь находятся в зависимости от климата, растительного покрова, почвообразовательных процессов и генезиса, и состава плотных пород (Опанасенко, 2014). И.А. Соколов (2004) в зависимости от указанных факторов и, в первую очередь, климата и состава пород, выделяет гумидный, аридный, ледниково-перигляциальный, вулканогенно-осадочный, гидротермальный типы экзогенеза и криоэкзогенез. В зависимости от доминирования типа экзогенеза геодерма подразделяется на гумидно-

тропический, ледниково-перигляциальный, аридный, криогенный и вулканогенный секторы. И при этом автор отмечает, что триада “факторы – процессы – свойства” образуют особенно сложные закономерности формирования геодермы в пограничных областях. В Забайкалье в связи с горно-котловинным рельефом, вертикальной поясностью, экспозиционностью склонов и сложным геологическим строением чаще встречаются пограничные зоны, нежели строго определенные типы экзогенеза и секторы геодермы. То есть для исследованной территории в современный период характерны и гумидный, и аридный типы экзогенеза вулканогенных и интрузивных пород в сочетании с различным влиянием криогенного фактора.

Район исследований находится в пределах Саяно-Байкальской складчатой области со сложным геологическим строением, образовавшимся в процессе многократных горообразовательных процессов. Витимское плоскогорье и Селенгинское среднегорье сформированы в пределах Селенгино-Витимской подвижной зоны (Флоренсов, Олюнин, 1965), длительность и сложность развития которой обусловлены положением тектонических структур, контактирующих с Сибирской платформой и с Монголо-Охотским складчатым поясом. В этих условиях внедрение в палеозое различного состава интрузий в многокилометровые протерозойские толщи морских осадков и продукты вулканических извержений послужило причиной преобладания гранитоидных пород, занимающих не менее 80% площади региона (Ярмолюк и др., 1997; Цыганков, 2014; Руженцев и др., 2012).

На исследованной территории этот магматизм начался с формирования известково-щелочных биотитовых гранитов Ангаро-Витимского батолита (баргузинский комплекс) (Салоп, 1967). В дальнейшем периодическая активизация тектонических движений и внедрение кислых и основных магм привели к формированию горно-котловинного рельефа, в котором на фоне гранитоидов встречаются различного возраста эфузивы.

Целью работы является характеристика почв на дериватах плотных пород различного состава и выявление их положения в субстантивно-генетической классификации почв России.

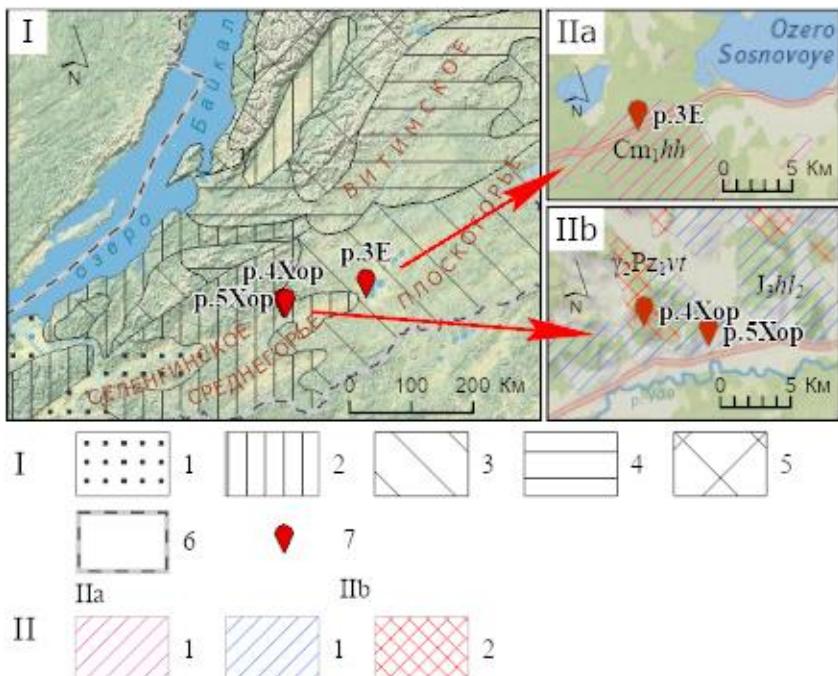
## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Для выявления специфики выветривания и почвообразования почвенные разрезы заложены на продуктах выветривания интрузивных и эфузивных пород в привершинной части возвышенностей с различными отметками и на различных породах в условиях влияния ММП (Геокриология СССР, 1989) в южной части Витимского плоскогорья (ключевой участок “Дархитуй”) и длительного сезонного промерзания на севере Селенгинского среднегорья (ключевые участки “Булум-1” и “Булум-2”) (рис. 1). Рельеф Витимского плоскогорья в южной части представлен невысокими увалами и межгорными понижениями с превышением < 100 м. Селенгинское среднегорье на территории исследования представлено хребтами и вытянутыми котловинами, ориентированными в направлении ЮЗ–СВ с превышением в основном < 100, редко до 200 м.

**Участок “Дархитуй”.** Согласно материалам геологосъемочных работ и геологической карте (Геологическая..., 1966) коренные породы участка “Дархитуй” представлены вулканогенно-пирокластическими метаэфузивами, мраморизованными известняками, метаморфическими сланцами, песчаниками хохюртовской свиты нижнего отдела кембрия ( $Cm_1hh$ ) (табл. 1, рис. 1).

**Участок “Булум-1”** в геологическом отношении представлен раннепалеозойскими биотитовыми гранитами, гранодиоритами и сиенитами Витимканского комплекса ( $PZ_1$ ), местами перекрытыми стратифицированными отложениями хилокской свиты ( $J_3$ ).

**Участок “Булум-2”** расположен в поле распространения хилокской свиты, пространственно тяготеющей к бортам Удинской впадины и представленной основными эфузивами базальтового ряда и осадочными породами. Хилокская свита состоит из нижней песчано-конгломератовой и верхней эфузивной подсвит, залегающих на поверхности размыва гранитоидов витимканского комплекса. Базальты верхней подсвиты пористые и миндалекаменные, темно-серого, черного, бурого цветов и относятся к трахибазальтовой формации.



**Рис. 1.** Расположение объектов исследования. I – геокриологическое районирование. 1 – редкоостровное (до 10% площади), мощность (м) до 15 м,  $t_{cp}$  от 4 до  $-0.5^{\circ}\text{C}$ ; 2 – островное (10–15% площади), m до 50 м,  $t_{cp}$  от 2 до  $-1.5^{\circ}\text{C}$ ; 3 – прерывистое (50–80% площади), m – 50–200 м,  $t_{cp}$  от 1 до  $-3^{\circ}\text{C}$ ; 4 – преимущественно сплошное (80–95 % площади), m – 100–300 м,  $t_{cp}$  от -1 до  $-5^{\circ}\text{C}$ ; 5 – сплошное, m – 300–500 м и более,  $t_{cp}$  от -3 до  $-7^{\circ}\text{C}$  и ниже; 6 – граница Республики Бурятия; 7 – почвенные разрезы. II – схемы геологического строения. IIa – ключевой участок “Дархитуй”. 1 – Кембрийская система. Нижний отдел. Хохортовская свита. Вулканогенно-пирокластические породы, мраморизованные известняки, метаморфические сланцы, песчаники. IIb – ключевой участок “Булум”. 1 – Юрская система. Верхний отдел. Хилокская свита. Верхняя подсвита. Трахибазальты, субщелочные базальты, плагиобазальты; 2 – Раннепалеозойские интрузии. II фаза. Лейкократовые биотитовые, реже двуслюдянные граниты ( $\gamma 2$ ); дайки микрогоитов ( $\rho 2$ ), жилы пегматитов ( $\rho 2$ ).

**Fig. 1.** Location of the research object. I – geocryological zoning. 1 – isolated patches (< 10% of area), depth < 15 m,  $T_{ave}$  from 4 to  $-0.5^{\circ}\text{C}$ ; 2 – sporadic (10–15% of area), depth < 50 m,  $T_{ave}$  from 2 to  $-1.5^{\circ}\text{C}$ ; 3 – discontinuous (50–80% of area), depth 50–200 m,  $T_{ave}$  from 1 to  $-3^{\circ}\text{C}$ ; 4 – discontinuous (80–95 % of area), depth 100–300 m,  $T_{ave}$  from  $-$  to  $-5^{\circ}\text{C}$ ; 5 – continuous, depth 300–500 m and over,  $T_{ave}$  from  $-3$  to  $-7^{\circ}\text{C}$  or less; 6 – border of the Russian Federation; 7 – soil pits. II – geological maps. IIa – The Darkhutui area. 1 – Lower Cambrian: the Khokhurt suit. Basic metaeffusive rocks, volcanogenic-pyroclastic rocks, marbled limestones, metamorphic shales, sandstones. IIb – The Bulum area. 1 – Upper Jurassic. The Khilok suite. Upper subsuite. Trachybasalts, subalkaline basalts, plagiobasalts; 2 – Early Paleozoic intrusions. Phase II. Leucocratic biotite, less commonly two-mica granites ( $\gamma_2$ ); microgranite dikes ( $\gamma_2$ ), pegmatite veins ( $\rho_2$ ).

**Таблица 1.** Экологические ниши почв

**Table 1.** Ecological niches of soils

Ключевой участок, разрез	“Дархитуй”, р. 3Е	“Булум-1”, р. 4Хор	“Булум-2”, р. 5Хор
Факторы почвообразования	Показатели		
Положение в рельефе	вершина	вершина	вершина
Высота, м	1017	870	780
Крутизна, °	1–3	< 1	< 1
Обломки пород в горизонте С или D	Дацит, базальт, песчаник, алевролит	Гранит, гранодиорит, сиенит	Базальт, глинистый сланец
Породообразующие и второстепенные минералы мелкозема материнской породы (из описания шлифов)	Калиевые полевые шпаты, кварц, слюда, плагиоклаз, биотит, магнетит, эпидот, амфибол, карбонаты	Кварц, плагиоклаз, микроклин, биотит	Плагиоклаз (основной) оливин, магнетит, амфибол, вулканическое стекло

**Продолжение таблицы 1**

**Table 1 continued**

Ключевой участок, разрез	“Дархитуй”, р. ЗЕ	“Булум-1”, р. 4Хор	“Булум-2”, р. 5Хор
<b>Факторы почвообразования</b>	<b>Показатели</b>		
Возраст коренных пород (по геологической карте)	Кембрий	Ранний палеозой	Юра
Почвообразующие породы	Тяжелый суглинок с присутствием щебня и дресвы	Щебнисто-дрессиянистый легкий суглиноок	Щебнисто-дрессиянистый песок связанный
Среднегодовая $t$ , °C	-4.1 °C	-2.7 °C	
Годовая $\sum$ осадков, мм	305	210	
Испаряемость, мм	496	496,5	535,5
$K_{увл}$	0.61	0.42	0.39
Глубина, см протаивания* / промерзания**	270–300*	300–400**	
Климат	Гумидный	Семиаридный	Аридный
Растительность	Лиственничный лес с березой	Редкостойный сосняк	Криоксерофитная степная

Юго-запад плоскогорья (участок “Дархитуй”) характеризуется среднегодовой температурой ( $t^{\circ}$ ) -4.1 °C, север Селенгинского среднегорья – -2.7 °C, сумма годовых осадков на юге плоскогорья составляет 305 мм/год против 210 на степном участке “Булум” (Жуков, 1960).

Вершина г. Дархитуй покрыта лиственничником. Климат характеризуется как гумидный или криогумидный. Вершины возышенностей участка “Булум-1” покрыты редкостойным сосняком, климат характеризуется как семиаридный. Вершины холмов

участка “Булум-2” покрыты криоксерофитным травянистым покровом, климат – аридный. Испаряемость на открытой местности резко увеличивается и коэффициент увлажнения в степной экосистеме понижается на ~0.2 единицы (Бадмаев, 2021). Ландшафты, подобные ландшафтам участка “Дархитуй”, характерны для Витимского плоскогорья, а ландшафты, подобные участку “Булум”, распространяются на юг до предгорий Хангая (Убугунов и др., 2018).

Анализ морфологического строения проведен в соответствии с методами, предлагаемыми Б.Г. Розановым (2004). Физико-химические свойства и химический состав определялись согласно “Теории и практике...” (2006). Определение гранулометрического состава почвы проводили при помощи лазерного дифракционного анализатора размера частиц (Konert, Vandenberghe, 1997). При определении классификационного положения почв руководствовались полевым определителем (Полевой, 2008).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

### Морфологическое строение почв

**Ключевой участок “Дархитуй”.** Разрез 3Е заложен в привершинной части горы Дархитуй с отметкой 1017 м, в ~8 км на запад от с. Сосново-Озерское. Координаты: 52°31'04.7" N, 111°26'02.3" E. Вершина выположена, уклон ~1–2° на запад. В микрорельфе приствольные повышения и западинки.

Растительность: лиственичный лес с березой (рис. 2б). Заросли кустарника: рододенрон даурский, спирея иволистная. В подлеске много подроста лиственницы, в напочвенном покрове – *Vaccinium vitis-idaea* L. – брусника обыкновенная, *Orthilia secunda* (L.) Hous – ортилия однобокая, *Lathyrus frolovii* Rupr – чина Фролова, *Calamagrostis epigeios* (L.) Roth – вейник наземный. Проективное покрытие 5–10%. Высота древостоя до 30 м, сомкнутость крон – 0.5. Приземная часть стволов повреждена низовым пожаром. Лес имеет признаки угнетенности в виде большого количества сухостоя подроста лиственницы.

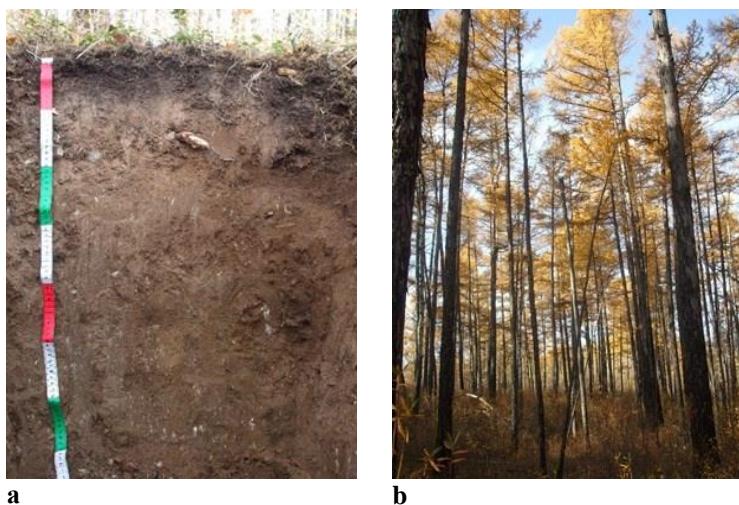


Рис. 2. Участок “Дархитуй”. **a** – профиль разреза 3Е; **b** – лиственничник.  
Fig. 2. The “Darkhituy” site. **a** – soil profile in soil pit 3E; **b** – larch forest.

Профиль почвы разреза 3Е состоит из горизонтов AYao (0–5/6) – AY (5/6–9) – AYe (9–14) – CRMi (14–32) – CRM (32–53) – BCcsm (53–108) (рис. 2а).

AYao (0–5/6 см). Сухой опад хвои лиственницы, в верхней части неразложившийся, в средней части – среднеразложившийся, буровато-темно-серый (7.5 YR 3/2), в нижней части (4–6 см) свежий, темно-серый до черного, с обилием грибных гифов и корней, ферментативный (70–80% органики).

AY (5/6–9). Свежий, на буровато-сером фоне (7.5 YR 4/1) буровато-темно-серые участки разлагающегося ОВ (7.5 YR 3/2). Рыхлый, слегка уплотнен корнями, по гранулометрическому составу – легкий суглинок, структура порошисто-комковатая, скреплена корнями. Включения дресвы, большого количества корней. Граница с кармановидными затеками.

AYe (9–14 см). Свежий, серовато-светло-бурый (7.5 YR 5/3), плотноватый, по гранулометрическому составу – средний суглинок, структура творожистая рассыпчатая (d агрегатов ~1–3 мм), частично скреплена корнями. Включения дресвы, щебня базальта, песчаника, алевролита, корней древесных растений, мелкозема

значительно больше, чем в АУ. Граница ровная.

CRMi (14–32 см). Влажноватый, бурый (7.5 YR 4/4), среднесуглинистый. Структура комковато-творожистая, сложная, мелкие агрегаты d 2–5 мм, крупные комки d 1–3 см. На поверхности агрегатов очень тонкая глинистая кутана. Плотный, но на участках с большим количеством корней – относительно рыхлый. Включения щебня и дресвы, покрытых глинистой кутаной, (~10% от массы почвы), древесных корней мочковатого типа, скрепляющих почву. Переход заметен по цвету, граница волнистая.

CRM (32–53 см). Влажноватый, желтовато-бурый (7.5 YR 5/4), среднесуглинистый опесчанившийся. Структура мелкотворожистая, рассыпчатая, скреплена корнями. Очень тонкая глинистая кутана по граням агрегатов. Включения дресвы, щебня (4–10 см) (< 10%). Щебень разрушается руками (сапролит) и при зачистке лопатой создает белые пятна. На поверхностях участки с белым налетом, возможно, аморфный кремнезем. Переход заметен по цвету. Граница ровная.

BCcrm (53–108 см). Влажноватый, буровато-желтый (10 YR 6/4), тяжелый суглинок, структура угловато-мелкокомковатая рассыпчатая, плотность неравномерная. Включения дресвы и корней. Обломки породы встречаются редко, представлены базальтами, песчаником и алевролитом. Доминирующие минералы из описаний шлифов почвообразующей породы: полевой шпат, кварц, слюда, плагиоклаз, биотит, магнетит, эпидот, амфибол, карбонаты, гиалобазальт, риолит-порфир. В сентябре почва талая. Температурные данные свидетельствуют о протаивании почвы на 270–300 см и смыкании сезонной мерзлоты с многолетней (табл. 1).

Для профиля почвы характерна замедленная гумификация лиственничного опада с образованием грубогумусированного горизонта и маломощного гумусового горизонта. Слой ферментации пронизан гифами грибов и, очевидно, продуцирует агрессивные формы гумуса, что способствует развитию оподзоливания и осветлению почвенной массы под гумусовым горизонтом. Особенностью морфологического строения исследованной почвы и почвообразующей породы является высокая степень трансформации плотных пород, сопровождающаяся формированием сапролитов и приводящая к оглиниванию. Продукты выветривания плотных

пород представляют собой легкий суглинок в поверхностных горизонтах, средний суглинок в средней части профиля, почвообразующая порода имеет тяжелосуглинистый состав. Количество щебня с глубиной уменьшается. Это может быть связано с возрастом плотных пород и глубоким химическим выветриванием.

Характерной чертой морфологического строения почвы также является высокая степень агрегированности не только почвенной массы, но и почвообразующей породы. В гумусовом горизонте агрегаты формируются благодаря влиянию свежего гумуса, определяющего порошистость и комковатость структуры. В минеральных горизонтах доминирует творожистость, а сама почвообразующая порода имеет угловато-мелкокомковатую рассыпчатую структуру. Учитывая, что глубина протаивания составляет 270–300 см, можно считать, что подобные виды структур являются признаком криогенного агрегирования и формирования криометаморфических почв в условиях глубокого протаивания и отсутствия надмерзлотного переувлажнения (Полевой..., 2008). Строение верхней части профиля свидетельствует о формировании типа почвы – дерново-криометаморфическая грубогумусированная, подтипа – оподзоленная.

**Ключевые участки “Булум-1” и “Булум-2”** заложены ~ в 100 км на ЗЮЗ от участка “Дархитуй”. В рельефе низкие горы и холмы. Привершинные части гор покрыты сосняками, склоны световых экспозиций и холмы – ксерофитной степной растительностью.

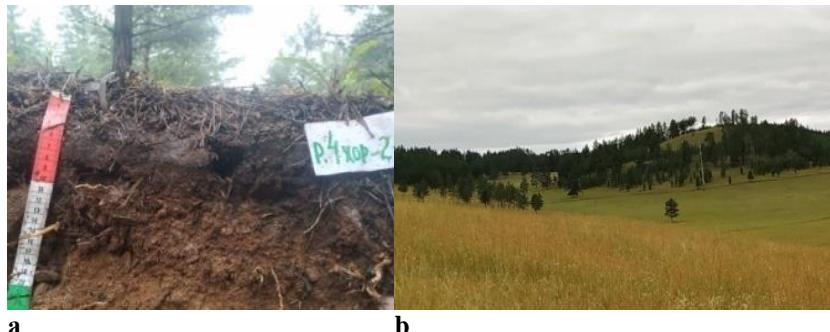
На участке “Булум-1” заложен разрез 4Хор. Местоположение ~ в 5 км на ЮЗ от с. Булум, в 35 км на СВ от п. Хоринск в привершинной части склона юго-западной экспозиции крутизной 3°–5°, координаты: 52°21'01" N; 110°13'27" E; h – 870 м.

Растительность: редкотравный разреженный сосновый лес (рис. 3б). Сомкнутость крон < 5.

В травянистом покрове осока стоповидная (*Carex pediformis* С.А. Mey.), горошек жилковатый (*Vicia nervata* Sipliv.), патриния скальная (*Patrinia rupestris* (Pall.) Dufr.), полынь пижмолистная (*Artemisia tanacetifolia* L.). Высота травостоя < 10 см. Проективное покрытие ~ 5%. В микрорельефе приствольные повышения, западинки.

Профиль почвы р. 4Хор состоит из горизонтов О (0–2) – АY (2–6) – Chf (6–14) – С (14–22) (рис. 3а).

О (0–2 см). Подстилка слаборазложившаяся, рыхлая, состоит из хвои сосны и остатков травянистых растений. Включение угольков.



**Рис. 3.** Участок “Булум-1”. **a** – профиль почвы разреза 4Хор; **b** – сосновый лес занимает привершинные части низких гор.

**Fig. 3.** The “Bulum-1” area. **a** – soil profile of the soil pit 4Хор; **b** – pine forest occupies the summit parts of the low mountains.

AY (2–6 см). Влажный. Буровато-серый (7.5 YR 3/3). По гранулометрическому составу – опесчаненный легкий суглинок. Структура комковатая. Рыхлый. Включения живых и мертвых корней, щебня, дресвы. Переход ясный по цвету. Граница ровная.

Chf (6–14 см). Свежий. Окраска охристо-бурая (7.5 YR 4/4). Опесчаненый средний суглинок, рыхлый. Структура непрочно-комковатая. Включения дресвы, корней. Переход ясный по цвету. Граница слабоволнистая.

R (14–20 см). Влажный. Окраска буровато-желтая (7.5 YR 4/6). Щебнистый с дресвиристо-песчаным с заполнителем. Плотный. Бесструктурный. Включения корней. Плотные породы представлены гранитом, гранодиоритом и сиенитом. Главные породообразующие минералы – кварц, калиевый полевой шпат, плагиоклаз, биотит (табл. 1).

Общая мощность профиля составляет 14 см, ниже залегает

плотная порода. Маломощность профиля является признаком почв отдела Литоземы. Наличие слаборазложившейся лесной подстилки свидетельствует о небольшом поступлении опада и его замедленной переработке. Гумусовый горизонт характеризуется буро-ватостью окраски, что позволяет предполагать образование форм гумуса, связанных с железом. Особенностью профиля почвы является аккумуляция железа и гумуса в горизонте Chf охристо-бурого цвета (7.5 YR 4/4). Щебнистые с песчаным с дресвой заполнителем продукты выветривания пород, обеспечивающие свободный дренаж, являются условием миграции веществ из гумусового горизонта. Указанные признаки обнаруживают принадлежность почвы к типу литоземы серогумусовые (Полевой..., 2008).

На участке “Булум-2”, расположеннном в 2.5 км на восток от участка “Булум-1”, на вершине холма, заложен разрез 5Хор (рис. 4). Координаты: 52°20'33" N; 110°15'55" E; h – 780 м.



**Рис. 4.** Участок “Булум-2”. **a** – профиль почвы разреза 5Хор; **b** – сухая степь занимает низкие горы и холмы.

**Fig. 4.** The “Bulum-2” area. **a** – soil profile of the soil pit 5Хор; **b** – dry steppe occupies low mountains and hills.

Растительность: криоксерофильная степная. В составе сообщества мятлик Крылова (*Poa krylovii* Revert), осока твердоватая *Carex duriusula* C.A. Meyer), горноколосник мягколистный (*Orostachys melacophylla* (Pall.) Fish), житняк гребенчатый (*Agropyron cristatum*), тонконог гребенчатый (*Koeleria cristata*), по-

лынь холодная (*Artemisia frigida* Willd.), лук неравногородий (*Allium anisopodium*), тимьян байкальский (*Thymus baicalensis*), таран узколистный (*Aconogonon angustifolium* (Pall.) H. Hara), юнгия тонколистная (*Youngia tenuifolia* (Willd.) Babc. Stebbins), еремогоне волосовидная (*Eremogone capillaris*), полынь одноколосая (*Artemisia monostachya* Bungeex Maxim). Высота травостоя ~ 30 см. Проективное покрытие травянистых растений ~ 30%, с мхами и лишайниками – 80–90%.

Профиль почвы состоит из горизонтов АК (0–14 см) – АС (14–20/22 см) – Р (> 22–28 см) (рис. 1а).

АК (0–14 см). Влажный. Окраска каштановая с красноватым оттенком (5 YR 4/2). Супесчаный, уплотнен корнями. Структура комковатая, скреплена корнями. Включения обилия корней, дресвы, единично – щебня. Переход постепенный, заметен по цвету. Граница ровная.

АС (14–20/22 см). Влажный. Окраска серовато-светло-бурая (10 YR 4/2). Супесчаный, плотноватый. Структура комковатая, хрупкая, легко рассыпается при давлении. Включения корней, щебня, дресвы. Переход резкий по содержанию щебня. Граница ясная по степени каменистости.

Р (> 22–28 см). Щебень остроугольной формы размером 5–7 см упакован плотно. В составе каменистой фракции плотной породы доминируют базальты, базальты с цеолитом и сланцы. Главные пордообразующие и акцессорные минералы представлены плагиоклазом (основным) оливином, магнетитом, с включением амфиболов, вулканического стекла.

Профиль почвы на вершине не покрытого лесом холма имеет мощность 20–22 см и резко сменяется плотной породой. Маломощность профиля и подстилание его плотной породой является признаком литозема (Полевой..., 2008). Гумусовый горизонт имеет красноватый оттенок – признак горизонта АК, что позволяет отнести почву к подтипу криогумусовые. Под гумусовым горизонтом выделяется серовато-светло-бурый переходный горизонт АС. Почва по морфологическому строению более близка к типу криогумусовые отдела литоземы.

## Физико-химические свойства

Гумусовые горизонты почвы участка “Дархитуй”, несмотря на таежный тип почвообразования, при условии влияния активной биогенной аккумуляции щелочноземельных катионов, имеют близкую к нейтральной реакцию среды (табл. 2). Почва, за исключением таежной подстилки, насыщена основаниями, что также может быть связано с влиянием мерзлоты, т. к. при кристаллизации вода очищается от примесей, а в талой части растворенные вещества концентрируются, частично выпадают в осадок и задерживаются в горизонте (Савич и др., 2020). В минеральных горизонтах реакция среды кислая, очевидно, в связи с формированием кислых форм гумуса и их вертикальной миграцией. Содержание органического вещества (ОВ) поверхностного горизонта и гумуса в горизонте АY высокое – 23.85% и 6.33%, ЕКО также высока. Указанные физико-химические свойства почвы могут способствовать развитию метаморфических процессов.

В почве под сосняком участка “Булум-1” гумусовый горизонт имеет нейтральную реакцию среды, а подгумусовый – слабокислую. Возможно, что этому способствует слабый вынос биогенных элементов в условиях semiаридного климата, а также процесс их аккумуляции при промерзании почвы. Содержание гумуса в аккумулятивном горизонте около 4%, вниз по профилю уменьшается постепенно в условиях короткопрофильности и высокого содержания корней и, очевидно, закрепления в виде соединений с железом. Поглотительная способность относительно невелика и снижается вниз по профилю постепенно. Все горизонты, и в т. ч. почвообразующая порода, насыщены основаниями. Почва имеет признаки дерново-подбуров (кислая или слабокислая реакция и характер распределения гумуса). Необходимо отметить, что почва формируется на дериватах гранитоидов. Возможно, это является условием формирования альфегумусовых почв. Все данные не противоречат отнесению почвы к подтипу литозем серогумусовый.

**Таблица 2.** Физико-химические свойства  
**Table 2.** Physicochemical properties

Горизонт, глубина, см	рН		Гумус общ., %	Обменные катионы		$H^+$ гидр.	ЕКО	СНО	
				Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>				
	H <sub>2</sub> O	KCl		смоль(экв)/кг почвы				%	
<i>Криометаморфическая грубогумусная, р. 3Е</i>									
AYao (0–5/6)	6.5	6.5	23.85*	30.00	1.25	35.9	67.15	46.54	
AY (5–9)	6.0	5.3	6.33	19.00	7.00	3.82	29.82	87.19	
AYe (9–14)	6.0	4.7	1.59	10.20	4.41	2.62	17.23	84.79	
CRMi (14–32)	6.1	4.5	0.81	11.25	8.75	2.11	22.11	90.46	
CRM (32–53)	6.2	4.5	0.83	13.10	8.75	2.16	24.01	91.00	
BCcrm (53–108)	6.2	4.5	0.84	12.10	8.53	2.16	22.79	90.52	
<i>Литозем серогумусовый, р. 4Хор</i>									
AY (2–8)	7.0	6.6	4.05	15.62	3.12	3.31	22.04	85.0	
Chf (8–16)	6.1	5.8	2.09	12.20	3.03	2.87	17.43	87.4	
C (16–22)	5.9	5.4	1.43	8.33	2.27	1.95	12.5	84.8	
<i>Литозем криогумусовый, р. 5Хор</i>									
AK (0–14).	7.3	-	4.60	24.00	10.00	-	34.00	0.19*	
AC (14– 20/22)	7.2	-	3.69	24.20	9.09	-	33.29	0.28*	

**Примечание.** \* – CO<sub>2</sub> карбонатов.

**Note.** \* – carbonates CO<sub>2</sub>.

В почве под ксерофитным травянистым покровом (р. 5Хор), в т. ч. и в гумусовых горизонтах, реакция слабощелочная. Содержание гумуса относительно высокое: в аккумулятивных горизонтах – больше 4%, в нижележащем – 3.7%, очевидно, в связи с короткопрофильностью и наличием корней. Поглотительная способность почвы значительно выше, чем в литоземе серогумусовом. Содержание  $\text{CO}_2$  карбонатов возрастает вниз по профилю. Указанные признаки, по-видимому, диктуются тем, что почва формируется на дериватах базальтов. В целом, несмотря на наличие сходства с криоаридными почвами, признаки литозема криогумусового доминируют.

Таким образом, физико-химические свойства исследованных почв имеют весьма значимые отличия и подтверждают принадлежность их разным типам. Причиной тому – различие занимаемых ими экологических ниш. Параметры экологических ниш задаются типами ландшафтов: таежные, лесные сосновые, ксерофитные степные. На географию последних большое влияние оказывают высотные отметки, наличие (отсутствие) многолетней мерзлоты и, очевидно, почвообразующие породы, представляющие собой дериваты сильно отличающихся по происхождению и возрасту коренных пород, их гранулометрический и вещественный составы.

### Гранулометрический состав

Выветривание пород и почвообразование в привершинной части возвышенности участка “Дархитуй” приводит к формированию мелкозема от средне- до тяжелосуглинистого состава на глубину 1 м и более (табл. 3). Содержание илистой фракции в почве участка “Дархитуй” колеблется в пределах 9.6–20.9%, возрастая вниз по профилю с резким увеличением в горизонте CRMi. Но наибольшее значение характерно для почвообразующей породы, которая имеет тяжелосуглинистый состав. Объяснить это можно не столько процессом иллиммеризации, сколько выветриванием, сапролитизацией и оглиниванием породы, происходивших после кембрия. Содержание песчаных и пылеватых фракций выше илистой примерно в 3 раза.

Гранулометрический состав литозема серогумусового обна-

руживает высокое содержание песчаных и пылеватых фракций и, в отличие от криометаморфической почвы, очень низкое содержание илистой фракции. Это свидетельствует о слабом глинистом метаморфизме, что характерно для выветривания гранитоидов. Очевидно, большое значение в развитии процессов выветривания имеет снижение высотных отметок. В почвообразующей породе доминирует средний песок, а содержание фракций крупной пыли максимально в поверхностном горизонте и снижается к почвообразующей породе. Это свидетельствует об активном опесчанивании почвообразующей породы и силтизации в почвенных горизонтах, где часто происходят переходы через нулевой рубеж, а изменения температуры характеризуются большой амплитудой.

В разрезе 5Хор участка “Булум-2” по горизонтам почвенно-го профиля отчетливо выраженного перераспределения фракций гранулометрического состава не наблюдается, что согласуется с данными Н.И. Белоусовой (2006), свидетельствующих о том, что в условиях аридного континентального климата, малой подвижности образующегося при выветривании мелкозема, состав последнего в значительной степени будет отражать состав коренных пород, а последний, в свою очередь, – свойства мелкозема. Доминирующими фракциями являются пылеватая и мелкопесчаная. Высокое содержание этих фракций может быть обусловлено не только физическим выветриванием, но и микроагрегацией тонкодисперсных частиц, цементированием их железом и последующей его кристаллизацией в период весенне-летнего иссушения и прогревания (Соколов и др., 2006; Макеев, 2019; Савич и др., 2020). Высокое содержание фракций пыли обуславливает снижение водопроницаемости (Цыбжитов, 2000).

Очевидно, что в результате выветривания и почвообразования в почвах формируются такие соотношения между фракциями песка, пыли и ила, которые обусловливают хорошие условия для фильтрации в почве под сосняком, затрудненные – под степью и хорошие, в условиях хорошей агрегированности, – под тайгой. Указанные различия в гранулометрическом составе пород и почв, а значит и в режиме влажности, по-видимому, должны влиять на все свойства почв, и в т. ч. на валовой химический состав.

**Таблица 3.** Гранулометрический состав почв  
**Table 3.** Soil texture

Горизонт, глубина, см	Содержание фракций (мм), %: размер частиц в мм									песок : пыль : ил
	1–0.25	0.25–0.05	0.05–0.01	0.01–0.005	0.005–0.001	< 0.001	< 0.01	1–0.05 песок	0.01–0.001 пыль	
<i>Криометаморфическая грубогумусная, р. 3Е</i>										
AY (5–9)	30.9	13.8	35.1	9.3	9.3	9.6	28.3	44.7	53.7	4.7 : 5.6 : 1.0
AYe (9–14)	32.2	17.3	26.4	10.2	11.2	13.7	35.0	49.5	47.8	3.6 : 3.5 : 1.0
CRMi (14–32)	31.9	13.2	23.5	12.3	8.5	18.3	39.1	45.1	44.3	2.5 : 2.4 : 1.0
CRM (32–53)	35.3	12.9	23.3	10.3	9.7	18.2	38.2	48.2	43.3	2.6 : 2.4 : 1.0
BCcrm (53–108)	39.2	11.6	17.6	10.2	10.5	20.9	43.7	50.8	38.3	2.4 : 1.8 : 1.0
<i>Литозем серогумусовый, р. 4Хор</i>										
AY (2–8)	16.8	35.8	25.2	8.0	11.4	2.8	22.2	52.6	44.6	18.8 : 15.9 : 1.0
Chf (8–16)	24.6	22.1	19.3	12.4	17.4	4.2	34.0	46.7	49.1	11.1 : 11.7 : 1.0
C (16–22)	40.6	13.1	17.3	10.5	14.9	3.6	29.0	53.7	42.7	14.9 : 11.9 : 1.0
<i>Литозем криогумусовый, р. 5Хор</i>										
AK (0–14)	1.4	45.6	42.9	3.7	4.8	1.6	10.1	47.0	51.4	29.4 : 32.1 : 1.0
AC (14–20/22)	2.0	41.5	48.0	3.0	4.0	1.4	8.4	43.5	55.0	31.1 : 39.3 : 1.0

## Валовой химический состав

Данные валового химического состава (табл. 4) показывают, что почвообразующая порода привершинной части почвы участка “Дархитуй”, представленная дериватами метаморфизованных эф-фузивов, известняков и сланцев кембрия, имеет кислый состав с содержанием  $\text{SiO}_2$  68.50%. В процессе почвообразования происходит вынос из верхней части профиля железа и алюминия, в меньшей степени – магния. При этом относительно накапливается кремнезем до 71.65%. В результате отношение  $\text{SiO}_2/\text{R}_2\text{O}_3$  вниз по профилю несколько снижается, обнаруживая основность коренных пород. Биогенно в аккумулятивных горизонтах накапливаются Mn, Ti, Ca, Na, P.

Легкосуглинистая каменистая порода под литоземом серогумусовым, формирующаяся на продуктах выветривания раннепалеозойских гранитоидов, имеет кислый состав. В отличие от криометаморфической почвы в верхней части профиля происходит аккумуляция не только Ca, Mg, Mn, Ti, K, P, но и Fe и Al, очевидно, в связи с semiаридностью климата и слабой выраженностью нисходящего движения влаги. Отчетливо выносится вниз по профилю только Na и K. Соответственно, отношение  $\text{SiO}_2/\text{R}_2\text{O}_3$  в горизонтах профиля ниже, чем в почвообразующей породе.

Резко отличается по содержанию  $\text{SiO}_2$  (~47–48%) почва под ксерофитной степной растительностью, формирующаяся на продуктах выветривания базальтов. Полученные данные демонстрируют более высокое содержание Fe, Al, Ca, Mg, Mn и Ti в горизонтах профиля по сравнению с почвами на дериватах метаэффузивов кембрия и гранитоидов палеозоя. Высокое содержание железа и биогенных элементов тесно связано с составом коренных пород. Очевидно также, что выносу веществ за пределы почвенно-го профиля препятствуют аридность климата и промерзание.

## ВЫВОДЫ

1. В целом анализ показал, что современные климатические и экологические факторы почвообразования в Забайкалье имеют большие отличия в зависимости от высотного положения территории и в меньшей степени от широты местности.

**Таблица 4.** Валовой химический состав почв (%) на прокаленную бескарбонатную навеску)

**Table 4.** The Bulk composition of soil (%) of calcined decarbonated weighed samples)

Горизонт, глубина, см	Пнн	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	TiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SiO <sub>2</sub> /R <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
<i>Криометаморфическая грубоогумусная, р. 3Е</i>												
A Yao (0–5/6)	24.84	69.32	14.77	4.78	0.51	0.90	2.01	1.00	3.78	2.18	0.31	3.55
AY (5–9)	16.09	70.55	14.66	4.48	0.42	0.89	1.56	0.92	3.92	2.30	0.24	3.69
AYe (9–14)	6.07	71.65	14.80	4.46	0.12	0.90	1.08	0.85	3.82	2.37	0.17	3.72
CRMi (14–32)	5.82	69.76	15.82	5.49	0.10	0.83	0.97	1.06	3.82	2.10	0.12	3.27
CRM (32–53)	5.93	68.46	16.16	5.85	0.22	0.87	1.02	1.12	3.83	2.14	0.12	3.11
BCcrm (53– 108)	5.99	68.50	16.17	6.03	0.21	0.87	1.01	1.12	3.84	2.16	0.12	3.09
<i>Литозем сероогумусовый, р. 4Хор</i>												
AY (2–8)	7.50	62.38	17.08	7.03	0.26	0.93	2.55	1.59	3.75	4.03	0.22	2.59
Chf (8–16)	5.20	63.58	17.06	6.96	0.15	0.90	2.19	1.44	3.71	4.16	0.15	2.65
C (16–22)	3.16	66.91	16.11	5.28	0.06	0.64	1.64	0.90	4.02	4.29	<0.10	3.13
<i>Литозем криогумусовый, р. 5Хор</i>												
AK (0–14)	9.91	48.63	17.06	14.41	0.23	3.16	6.76	2.98	2.67	3.11	1.66	1.55
AC (14– 20/22)	9.64	47.37	17.39	15.27	0.25	3.20	7.08	3.18	2.56	3.13	1.73	1.45

Разнообразие различных экологических ниш обусловливают формирование почв, морфологическое строение которых характеризуется ярко выраженным отдельными чертами.

2. Наряду со всеми параметрами экологических ниш большое влияние на валовой и гранулометрический составы, физико-химические свойства и классификационное положение оказывают состав и свойства продуктов выветривания коренных пород.

3. На дериватах вулканогенно-пирокластических метаэфузивов, мраморизованных известняков, метаморфических сланцев и песчаников кембрия, в условиях глубокого протаивания мерзлоты формируются криометаморфические грубогумусированные оподзоленные почвы.

4. В почвах semiаридных и аридных условий почвообразование и выветривание приводят к накоплению пылеватых и мелкопесчаных фракций и к весьма слабому развитию оглинивания.

5. На дериватах раннепалеозойских биотитовых гранитов, гранодиоритов и сиенитов Витимканского комплекса раннего палеозоя в semiаридных условиях под влиянием длительного сезонного промерзания в поясе сосновых лесов формируются литоземы серогумусовые, несущие признаки развития альфегумусовых процессов.

6. На продуктах выветривания основных пород юрского периода в сухостепном поясе под криоксерофильными степями в аридных условиях в привершинных частях холмов и низких гор формируются литоземы криогумусовые с признаками криоаридных почв.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бадмаев Н.Б., Гынинова А.Б., Цыбенов Ю.Б. Климатические ареалы полей в координатах системы “почва-климат” по территории южной границы криолитозоны Забайкалья // Вестник Бурятского государственного университета. Биология, География. 2021. № 2. С. 3–14. DOI: <https://doi.org/10.18101/2587-7143-2021-2-3-14>.
2. Балсанова Л.Д., Бадмаев Н.Б., Найданов Б.Б., Балсанов А.В. Разнообразие и свойства буроземов прибрежных горных поднятий на восточном побережье оз. Байкал // Вестник Бурятского государственного университета. Биология, География. 2022. №3. С. 4–12. DOI: <https://doi.org/10.18101/2587-7143-2022-3-3-13>.

3. Балсанова Л.Д., Гынинова А.Б., Бадмаев Н.Б. Роль литогенной основы в формировании разнообразия дерново-подбров в Забайкалье // Доклады РАСХН. 2015. № 6. С. 28–31.
4. Белоусова Н.И. Внутрипочвенное выветривание основных пород в гумидных полярно- boreальных условиях // Почвообразовательные процессы. М.: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 2006. С. 91–141.
5. Вторушин В.А. Автоморфные почвы горной тайги Центральной части Южного Забайкалья. Новосибирск: Наука, 1982. 176 с.
6. Геологическая карта Бурятской АССР масштаба 1 : 200 000. Объяснительная записка. Л.: Ленкартфабрика, 1966. 150 с.
7. Геокриология СССР. Горные страны юга СССР / Под ред. Э.Д. Ерикова. М.: Недра, 1989. 359 с.
8. Горячkin С.В. Почвенный покров Севера (структура, генезис, экология, эволюция). М.: ГЕОС, 2010. 414 с.
9. Горячkin С.В., Водяницкий Ю.Н., Конюшков Д.Е., Лесовая С.Н., Мергелов Н.С., Титова А.А. Биокоиматогенные и геогенные проблемы географии почв Северной Евразии // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2008. Вып. 62. С. 48–68.
10. Градусов Б.П. Закономерности географии и генезиса минералого-кристаллохимической основы почв и процессов ее изменений при почвообразовании // Почвоведение. 2005. № 9. С. 1138–1146.
11. Гынинова А.Б., Бадмаев Н.Б. Микроморфологическая диагностика почвообразовательных процессов в почвах Еравнинской котловины Забайкалья // Вестник Бурятского государственного университета. Биология, География. 2021. № 2. С. 15–30. DOI: <https://doi.org/10.18101/2587-7143-2021-2-15-30>.
12. Дугаров В.И., Куликов А.И. Агрофизические свойства мерзлотных почв. Новосибирск: Наука СО РАН, 1990. 255 с.
13. Жуков В.М. Климат Бурятской АССР. Улан-Удэ: Бурят. кн. изд-во, 1960. 188 с.
14. Макеев О.В. Криология почв. М.: РАН, 2019. 464 с.
15. Ногина Н.А. Почвы Забайкалья. М.: Наука, 1964. 314 с.
16. Опанасенко Н.Е. Роль рельефа и плотных горных пород в выветривании и почвообразовании скелетных почв // Бюллетень ГНБС. 2015. Вып. 114 С. 69–74. URL: <https://boolt.nbgnsc.ru/download/114/114.pdf>.
17. Полевой определитель Почв России. М.: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 2008. 182 с.
18. Почвы холодных областей: генезис, география, экология (к 100-летию профессора О.В. Макеева). Путеводитель научных экскурсий

Всероссийской научной конференции с международным участием.  
Москва–Улан-Удэ, 2015. 178 с.

19. Розанов Б.Г. Морфология почв. М.: Акад. Проект, 2004. 431 с.
20. Руженцев С.В., Минина О.Р., Некрасов Г.Е., Аристов В.А., Голионко Б.Г., Доронина Н.А., Лыхин Д.А. Байкало-Витимская складчатая система: строение и геодинамическая эволюция // Геотектоника. 2012. № 2. С. 3–28.
21. Салоп Л.И. Геология Байкальской горной области. Т. 2. М., 1967. 653 с.
22. Савич В.И., Белопухов С.Л., Балабко П.Н., Сорокин А.Е., Дмитревская И.И. Влияние промораживания и криогенеза на свойства почв // Вестник РГАТУ. 2020. № 1(45). С. 52–56. DOI: <https://doi.org/10.36508/RSATU.2020.45.1.009>.
23. Соколов И.А. Вулканлизм и почвообразование. М.: Наука, 1973. 224 с.
24. Соколов И.А. О геохимии почвенного внутригоризонтного выветривания // Проблемы почвоведения. М.: Наука, 1978. С. 236–244.
25. Соколов И.А. Почвообразование и экзогенез. М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 1997. 244 с.
26. Соколов И.А. Теоретические проблемы генетического почвоведения. Новосибирск: “Гуманитарные технологии”, 2004. 288 с.
27. Соколов И.А., Конюшков Д.Е., Наумов Е.М., Ананко Т.В., Якушева Т.Е. Почвенный криогенез // Почвообразовательные процессы. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2006. С. 144–167.
28. Таргульян В.О. Почвообразование и выветривание в холодных гумидных областях. М.: Наука, 1971. 268 с.
29. Теория и практика химического анализа почв. М.: ГЕОС, 2006. 400 с.
30. Убугунов В.Л., Убугунова В.И. Почвообразующие породы – ключ к пониманию самобытности почвообразования в Западном Забайкалье // Природа внутренней Азии. 2017. № 4(5) С. 37–50. DOI: <https://doi.org/10.18101/2542-0623-2017-4-37-50>.
31. Убугунов Л.Л., Убугунова В.И., Белозерцева И.А., Гынинова А.Б., Сороковой А.А., Убугунов В.Л. Почвы и почвенный покров бассейна оз. Байкал // География и природные ресурсы. 2018. № 4. С. 65–71.
32. Убугунова В.И., Цыблжитов Ц.Х., Большаков В.А. Бурые горно-лесные почвы Прибайкалья // Почвоведение. 1985. № 7. С. 14–24.
33. Флоренсов Н.А., Олюнин В.А. Рельеф и геологическое строение // Прибайкалье и Забайкалье. М.: Наука, 1965. С. 23–91.
34. Фридланд В.М. О роли выветривания в создании почвенного профиля и разделении почвенной массы // Почвоведение. 1955. № 12. С. 7–17.
35. Цыблжитов Ц.Х., Убугунова В.И. Генезис и география таежных почв бассейна оз. Байкал. Улан-Удэ, 1992. 239 с.

36. Цыбжистов Ц.Х., Цыбжистов А.Ц. Почвы бассейна озера Байкал. Т. 3: Генезис, география и классификация таежных почв. Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2000. 172 с.
37. Цыганков А.А. Позднепалеозойские гранитоиды Западного Забайкалья: последовательность формирования, источники магм, геодинамика // Геология и геофизика. 2014. Т. 55(2). С. 197–227.
38. Ярмолюк В.В., Будников С.В., Коваленко В.И., Антипин В.С., Горегляд А.В., Сальникова Е. Б., Котов А.Б., Козаков И.А., Ковач В.П., Яковлева З.С., Бережная Н.Г. Геохронология и геодинамическая позиция Ангаро-Витимского батолита // Петрология. 1997. Т. 5. № 5. С. 451–466.
39. Gyninova A.B., Badmaev N.B., Cybenov Yu.B., Gonchikov B-M.N., Mangataev A.T., Kulikov A.I., Sympilova D.P. Soils of the Darkhitui catena in the southern Vitim Plateau and their micromorphological features // IOP Conference. Series: Earth and Environmental Science. The VIII Congress of the Dokuchaev Soil Science Society. Syktyvkar: 2021. 862 012068.
40. Konert M., Vandenberghe J. Comparison of laser grain size analysis with pipette and sieve analysis: a solution for the underestimation of the clay fraction // Sedimentology. 1997. Vol. 44(3). P. 523–535.

## REFERENCES

1. Badmaev N.B., Gyninova A.B., Tsybenov Ju.B., Klimaticheskie arealy polej v koordinatah sistemy “pochva-klimat” po territorii yuzhnoj granicy kriosolitozony Zabajkal’ya (Climatic areas of fields in the coordinates of the soil-climate system along the southern boundary of the Transbaikal permafrost zone), *Vestnik Buryatskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya, Geografiya*, No. 2, pp. 3–14, DOI: <https://doi.org/10.18101/2587-7143-2021-2-3-14>.
2. Balsanova L.D., Badmaev N.B., Najdanov B.B., Balsanov A.V., Raznoobrazie i svojstva burozemov pribrezhnyh gornyh podnyatiy na vostochnom poberezh’e oz. Bajkal (Diversity and properties of burozems of coastal mountain uplifts on the eastern coast of Lake Baikal), *Vestnik Buryatskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya, Geografiya*, 2022, No. 3, pp. 4–12, DOI: <https://doi.org/10.18101/2587-7143-2022-3-3-13>.
3. Balsanova L.D., Gyninova A.B., Badmaev N.B., Rol’ litogennoj osnovy v formirovaniyu raznoobraziya dernovo-podburov v Zabajkal’ye (The role of the lithogenic base in the formation of soddy podbur diversity in Transbaikalia), *Doklady RASHN*, 2015, No. 6, pp. 28–31.
4. Belousova N.I., Vnutripochvennoe vyvetrивание osnovnyh porod v gumiidnyh polyarno-boreal’nyh usloviyah (Intrasoil weathering of basic rocks under humid polar-boreal conditions), In: *Pochvoobrazovatel’nye process* (Soil for-

- mation processes), Moscow: Pochvennyj in-t im. V.V. Dokuchaeva, 2006, pp. 91–141.
5. Vtorushin V.A., *Avtomorfnye pochvy gornoj tajgi Central'noj chasti Yuzhnogo Zabajkal'ya* (Automorphic soils of the mountain taiga of the central part of southern Transbaikalia), Novosibirsk: Nauka, 1982, 176 p.
  6. *Geologicheskaya karta Buryatskoj ASSR masshtaba 1 : 200 000. Ob'yasnitel'naya zapiska* (Geological map of the Buryat ASSR at a scale of 1 : 200,000. Explanatory note), Leningrad: Lenkartfabrika, 1966, 150 p.
  7. E.D. Ershov (Ed.), *Geokriologija SSSR. Gornye strany juga SSSR* (Geocryology of the USSR. Mountainous countries of the south of the USSR), Moscow: Nedra, 1989, 359 p.
  8. Goryachkin S.V., *Pochvennyj pokrov Severa (struktura, genezis, ekologiya, evolyuciya)* (Soil cover of the North (structure, genesis, ecology, evolution)), Moscow: GEOS, 2010, 414 p.
  9. Goryachkin S.V., Vodyanickij Yu.N., Konyushkov D.E., Lesovaya S.N., Mergelov N.S., Titova A.A., *Biokoimatogennye i geogennye problem geografii pochv Severnoj Evrazii* (Biocoimaticogenous and geogenic problems of soil geography in Northern Eurasia), *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2008, No. 62, pp. 48–68.
  10. Gradusov B.P., *Zakonomernosti geografii i genezisa mineralogokristallohimicheskoy osnovy pochv i processov ee izmenenij pri pochvoobrazovanii* (Patterns of geography and genesis of the mineralogical and crystallochemical basis of soils and the processes of its changes during soil formation), *Pochvovedenie*, 2005, No. 9, pp. 1138–1146.
  11. Gyninova A.B., Badmaev N.B., *Mikromorfologicheskaya diagnostika pochvoobrazovatel'nyh processov v pochvah Eravninskoy kotloviny Zabajkal'ya* (Micromorphological diagnostics of soil-forming processes in soils of the Eravninskaya depression of Transbaikalia), *Vestnik Buryatskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya, Geografiya*, 2021, No. 2, pp. 15–30, DOI: <https://doi.org/10.18101/2587-7143-2021-2-15-30>.
  12. Dugarov V.I., Kulikov A.I., *Agrofizicheskie svojstva merzlotnyh pochv* (Agophysical properties of permafrost soils), Novosibirsk: Nauka SO RAN, 1990, 255 p.
  13. Zhukov V.M., *Klimat Burjatskoj ASSR* (Climate of the Buryat ASSR), Ulan-Udje: Burjat. kn. izd-vo, 1960, 188 p.
  14. Makeev O.V., *Kriologiya pochv* (Soil cryology.), Moscow: RAN, 2019, 464 p.
  15. Nogina N.A., *Pochvy Zabajkal'ya* (Soils of Transbaikalia), Moscow: Nauka, 1964, 314 p.
  16. Opanasenko N.E., *Rol' rel'efa i plotnyh gornyh porod v vyvetrivanii i pochvoobrazovanii skeletnyh pochv* (The role of relief and dense rocks in

- weathering and soil formation of skeletal soils), *Byulleten' GNBS*, 2014, Vol. 114, pp. 69–74, URL: <https://boot.nbgnsu.ru/download/114/114.pdf>.
17. *Polevoj opredelitel' Pochv Rossii* (Field guide to soils of Russia), Moscow: Pochvennyj in-t im. V.V. Dokuchaeva, 2008, 182 p.
18. *Pochvy holodnyh oblastej: genezis, geografiya, ekologiya* (k 100-letiyu professora O.V. Makeeva) (Soils of cold regions: genesis, geography, ecology (on the 100th anniversary of professor o. V. Makeev)), Putevoditel' nauchnyh ekskursij Vserossijskoj nauchnoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem (Guide to scientific excursions of theAall-russian scientific conference with international participation), Moscow–Ulan-Ude, 2015, 178 p.
19. Rozanov B.G., *Morfologiya pochv* (Soil morphology), Moscow: Akad. Proekt, 2004, 431 p.
20. Ruzhencev S.V., Minina O.R., Nekrasov G.E., Aristov V.A., Golionko B.G., Doronina N.A., Lyhin D.A., Bajkalo-Vitimskaya skladchataya sistema: stroenie i geodinamicheskaya evolyuciya (Baikal-Vitim fold system: structure and geodynamic evolution), *Geotektonika*, 2012, No. 2, pp. 3–28.
21. Salop L.I., *Geologija Bajkal'skoj gornoj oblasti* (Geology of the Baikal mountain region), Vol. 2., Moscow, 1967, 653 p.
22. Savich V.I., Belopuhov S.L., Balabko P.N., Sorokin A.E., Dmitrevskaya I.I., Vliyanie promorazhaivaniya i kriogeneza na svojstva pochv (The influence of freezing and cryogenesis on soil properties), *Vestnik RGATU*, 2020, No. 1(45), pp. 52–56, DOI: <https://doi.org/10.36508/RSATU.2020.45.1.009>.
23. Sokolov I.A., *Vulkanizm i pochvoobrazovanie* (Volcanism and soil formation), Moscow: Nauka, 1973, 224 s.
24. Sokolov I.A., O geohimii pochvennogo vnutrigorizontnogo vyvetrivanija (On the geochemistry of soil intrahorizon weathering), In: *Problemy pochvovedeniya* (Problems of soil science), Moscow: Nauka, 1978, pp. 236–244.
25. Sokolov I.A., *Pochvoobrazovanie i ekzogenes* (Soil formation and exogenesis), Moscow: Pochvennyj institut im. V.V. Dokuchaeva, 1997, 244 p.
26. Sokolov I.A., *Teoreticheskie problem geneticheskogo pochvovedeniya* (Theoretical problems of genetic soil science), Novosibirsk: "Gumanitarnye tekhnologii", 2004, 288 p.
27. Sokolov I.A., Konyushkov D.E., Naumov E.M., Ananko T.V., Yaksheva T.E., Pochvennyj kriognnez (Soil cryogenesis), In: *Pochvoobrazovatel'nye processi* (Soil formation processes), Moscow: Pochv. in-t im. V.V. Dokuchaeva, 2006, pp. 144–166.
28. Targul'yan V.O., *Pochvoobrazovanie i vyvetrivanie v holodnyh gumenyih oblastyah* (Soil formation and weathering in cold humid regions), Moscow: Nauka, 1971, 268 p.

29. *Teoriya i praktika himicheskogo analiza pochv* (Theory and practice of chemical analysis of soils), Moscow: GEOS, 2006, 400 p.
30. Ubugunov V.L., Ubugunova V.I., *Pochvoobrazuyushchie porody – klyuch k ponimaniyu samobytnosti pochvoobrazovaniya v Zapadnom Zabajkal'e* (Soil-forming rocks – the key to understanding the uniqueness of soil formation in Western Transbaikalia), *Priroda vnutrennej Azii*, 2017, No. 4(5), pp. 37–50, DOI: <https://doi.org/10.18101/2542-0623-2017-4-37-50>.
31. Ubugunov L.L., Ubugunova V.I., Belozerceva I.A., Gyninova A.B., Sorokovoj A.A., Ubugunov V.L., *Pochvy i pochvennyj pokrov bassejna oz. Bajkal* (Soils and soil cover of the Lake Baikal basin), *Geografiya i prirodnye resursy*, 2018, No. 4, pp. 65–71.
32. Ubugunova V.I., Tsybzhitov C.H., Bol'shakov V.A., Burye gorno-lesnye pochvy Pribajkal'ya (Brown mountain forest soils of the Baikal region), *Pochvovedenie*, 1985, No. 7, pp. 14–24.
33. Florensov H.A., Olyunin V.A., *Rel'ef i geologicheskoe stroenie* (Relief and geological structure), In: *Pribajkal'e i Zabajkal'e*, Moscow: Nauka, 1965, pp. 23–91.
34. Fridland V.M., *O roli vyvetrivaniya v sozdaniii pochvennogo profilya i razdelenii pochvennoi massy* (On the role of weathering in the formation of a soil profile and the division of the soil mass), *Pochvovedenie*, 1955, No. 12, pp. 7–17.
35. Tsybzhitov C.H., Ubugunova V.I., *Genezis i geografiya taezhnyh pochv bassejna oz. Bajkal* (Genesis and geography of taiga soils of the Lake Baikal basin), Ulan-Ude, 1992, 239 p.
36. Tsybzhitov C.H., Tsybzhitov A.C., *Pochvy bassejna ozera Bajkal. Vol. 3: Genezis, geografiya i klassifikaciya taezhnyh pochv* (Soils of the Lake Baikal basin. Vol. 3: Genesis, geography, and classification of taiga soils), Ulan-Ude: Izd-vo BNC SO RAN, 2000, 172 p.
37. Tsygankov A.A., *Pozdnepaleozojskie granitoidy Zapadnogo Zabajkal'ya: posledovatel'nost' formirovaniya, istochnikimagr, geodinamika* (Late Paleozoic granitoids of Western Transbaikalia: formation sequence, magma sources, geodynamics), *Geologiya i geofizika*, 2014, Vol. 55(2), pp. 197–227.
38. Yarmolyuk V.V., Budnikov S.V., Kovalenko V.I., Antipin V.S., Goreglyad A.V., Sal'nikova E. B., Kotov A.B., Kozakov I.A., Kovach V.P., Yakovleva Z.S., Berezhnaya N.G., *Geohronologiya i geodinamicheskaya poziciya Angaro-Vitimskogo batolita* (Geochronology and geodynamic position of the Angara-Vitim batholith), *Petrologiya*, 1997, Vol. 5, No. 5, pp. 451–466.
39. Gyninova A.B., Badmaev N.B., Cybenov Yu.B., Gonchikov B-M.N., Mangataev A.T., Kulikov A.I., Sympilova D.P., *Soils of the Darkhitui catena in the southern Vitim Plateau and their micromorphological features*, *IOP*

Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2025. Вып. 126  
Dokuchaev Soil Bulletin, 2025, 126

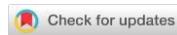
*Conference Series: Earth and Environmental Science*, Syktyvkar, 2021, 862  
012068.

40. Konert M., Vandenberghe J., Comparison of laser grain size analysis with pipette and sieve analysis: a solution for the underestimation of the clay fraction, *Sedimentology*, 1997, Vol. 44(3), pp. 523–535.

УДК 631.4



DOI: 10.19047/0136-1694-2025-126-68-89



#### Ссылки для цитирования:

Прудникова Е.Ю., Савин И.Ю., Виндекер Г.В., Вернюк Ю.И., Ребух Н.Я., Фомичева Н.В., Кавиза Н.Д. Особенности дистанционной диагностики агрохимических свойств пахотных почв // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2025. Вып. 126. С. 68-89. DOI: 10.19047/0136-1694-2025-126-68-89

#### Cite this article as:

Prudnikova E.Yu., Savin I.Yu., Windecker G.V., Vernyuk Yu.I., Rebouh N.Ya., Fomicheva N.V., Kaviza N.D., Peculiarities of remote sensing diagnostics of agrochemical properties of arable soils, Dokuchaev Soil Bulletin, 2025, V. 126, pp. 68-89, DOI: 10.19047/0136-1694-2025-126-68-89

#### Благодарность:

Публикация выполнена в рамках Проекта <№ 202786-2-000> Системы грантовой поддержки научных Проектов РУДН.

#### Acknowledgments:

The publication was carried out within the framework of the Project <No. 202786-2-000> of the System of Grant Support for Scientific Projects of RUDN University.

## Особенности дистанционной диагностики агрохимических свойств пахотных почв

© 2025 г. Е. Ю. Прудникова<sup>1</sup>, И. Ю. Савин<sup>1,2\*</sup>,  
Г. В. Виндекер<sup>1\*\*</sup>, Ю. И. Вернюк<sup>1\*\*\*</sup>, Н. Я. Ребух<sup>1,2\*\*\*\*</sup>,  
Н. В. Фомичева<sup>1</sup>, Н. Д. Кавиза<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФИЦ “Почвенный институт им. В.В. Докучаева”, Россия,  
119017, Москва, Пыхлевский пер, 7, стр. 2,

\*e-mail: [savin\\_iyu@esoil.ru](mailto:savin_iyu@esoil.ru),

\*\*<https://orcid.org/0000-0002-0463-4241>,

\*\*\*<https://orcid.org/0000-0002-3621-8330>,

\*\*\*\*<https://orcid.org/0000-0002-8621-65957>.

<sup>2</sup>Институт экологии РУДН, Россия,  
115093, Москва, Подольское ш., 8.

Поступила в редакцию 22.03.2025, после доработки 16.05.2025,  
принята к публикации 13.11.2025

**Резюме:** Агрохимическое обследование пахотных почв трудоемко, затратно и требует много времени. Внедрение современных дистанционных и цифровых технологий содержит большой потенциал для преодоления данных недостатков, но требует дополнительных научных исследований. В статье приведены результаты сравнения эффективности использования разных типов дистанционных данных для моделирования основных агрохимических свойств почв на примере тестового участка в Тверской области. Проводилось полевое определение спектральной отражательной способности поверхности почв, ее одновременная съемка с использованием беспилотного летательного аппарата (БПЛА) со стандартной фотокамерой, а также анализ изображения тестового участка на спутниковых изображениях Sentinel-2. Регрессионный анализ показал, что наиболее точные модели связи данных агрохимического обследования почв могут быть получены на основе полевого спектрометрирования, менее качественные модели получены с использованием данных БПЛА, и наименее качественные модели – на основе спутниковых данных. Основной причиной этого, по-видимому, является пространственное варьирование агрохимических показателей почв и генерализованность изображения их открытой поверхности на данных БПЛА и спутниковых снимках.

**Ключевые слова:** агрохимические свойства почв; регрессионный анализ; БПЛА; Sentinel-2; спектральная отражательная способность почв; Тверская область; ГИС.

## Peculiarities of remote sensing diagnostics of agrochemical properties of arable soils

© 2025 E. Yu. Prudnikova<sup>1\*</sup>, I. Yu. Savin<sup>1,2\*\*</sup>,  
G. V. Windecker<sup>1</sup>, Yu. I. Vernyuk<sup>1</sup>, N. Ya. Rebouh<sup>1,2</sup>,  
N. V. Fomicheva<sup>1</sup>, N. D. Kaviza<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Federal Research Centre “V.V. Dokuchaev Soil Science Institute”,  
7 Bld. 2 Pyzhevskiy per., Moscow 119017, Russian Federation,*

<sup>\*</sup>*e-mail: [savin\\_iyu@esoil.ru](mailto:savin_iyu@esoil.ru),*

<sup>\*\*</sup>*<https://orcid.org/0000-0002-0463-4241>,*

<sup>\*\*\*</sup>*<https://orcid.org/0000-0002-3621-8330>,*

<sup>\*\*\*\*</sup>*<https://orcid.org/0000-0002-8621-65957>.*

<sup>2</sup>*Institute of Environmental Engineering, RUDN University,  
8 Podolskoe shosse, Moscow 115093, Russian Federation.*

*Received 22.03.2025, Revised 16.05.2025, Accepted 13.11.2025*

**Abstract:** Agrochemical surveys of arable soils are laborious, costly and time-consuming. The introduction of modern remote sensing and digital technologies has great potential to overcome these disadvantages, but requires additional scientific research. The article presents the results of a comparison of the efficiency of using different types of remote sensing data for spatial modeling the main agrochemical properties of soils by the example of a test site in the Tver region. The spectral reflectance of the soil surface was determined in the field, its simultaneous measurement by an unmanned aerial vehicle (UAV) with a standard camera, and additionally the test plot was analyzed on Sentinel-2 satellite images. Regression analysis showed that the most accurate predictive models of soil agrochemical properties can be obtained from field spectrometry, lower quality models are obtained from UAV data, and the lowest quality models are obtained from satellite data. The main reason for this seems to be the spatial variation of soil agrochemical parameters and the generalized representation of their open surface on UAV data and satellite images.

**Keywords:** agrochemical soil properties; regression analysis; UAV; Sentinel-2; spectral reflectance of soils; Tver region; GIS.

## ВВЕДЕНИЕ

Урожайность сельскохозяйственных культур во многом определяется состоянием почв и наличием в них доступных питательных веществ. Для учета этого фактора в сельскохозяйственном производстве проводится почвенное и агрохимическое обследование земель, результатом которого являются карты параметров почвенного плодородия. Кроме того, регулярный мониторинг показателей плодородия пахотных почв необходим для своевременного выявления развития негативных процессов, определения необходимых агротехнологических мероприятий, рационального внесения удобрений и предотвращения деградации почв и земель.

Картографирование параметров почвенного плодородия проводится преимущественно на основе данных полевых работ и лабораторных исследований образцов почв. Работы ведутся в соответствии с утвержденными методиками (Методические указания..., 2003) и предполагают отбор и анализ большого количества почвенных образцов, что требует существенных временных и финансовых затрат. С другой стороны, пространственная частота пробоотбора при агрохимическом обследовании почв не доста-

точна для отображения пространственного варьирования показателей плодородия пахотных почв, особенно элементов питания, содержание которых может сильно варьировать в пространстве (Wetterlind et al., 2010; Nyéki et al., 2022). Таким образом, большая трудоемкость полевых работ и достаточно сильная изменчивость параметров плодородия почв приводят к тому, что получить оперативно подобные данные для больших территорий традиционными методами практически невозможно и очень затратно.

Однако на протяжении последних десятилетий ведутся разработки в области создания новых методов картографирования параметров плодородия почв, основанных на использовании данных дистанционного зондирования (Савин, Симакова, 2012). Эти методы могут быть использованы для картографирования и оперативного мониторинга параметров плодородия пахотных почв (Ben-Dor, Banin, 1995; Viscarra Rossel et al., 2006; Савин и др., 2019; Prudnikova, Savin, 2021). Но, до сих пор они не нашли широкого применения в практике агрохимического обследования пахотных земель, что связано с целым рядом существующих ограничений и их недостаточной изученностью. Целью данной статьи был сравнительный анализ качества регрессионного моделирования параметров плодородия пахотных почв тестового участка в Тверской области с использованием данных дистанционного зондирования, различающихся уровнем пространственного обобщения информации.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Тестовое поле расположено на землях Всероссийского научно-исследовательского института мелиорированных земель (филиал ФИЦ “Почвенный институт им. В.В. Докучаева”, н. п. Эммаус, Тверская область) (рис. 1).

Размеры тестового участка составляют 90 на 120 м (1.08 га). Территория участка характеризуется выпукленным рельефом с перепадом высот не более 1–2 м. В почвенном покрове господствуют осушенные закрытым дренажем дерново-подзолистые оглеенные почвы, развитые на супесях и легких суглинках, подстилаемых флювиогляциальными песками, часто с большим количеством валунных и галечниковых включений. Поверхность поля

в момент отбора образцов и съемки была проборонована перед севом пшеницы, растительность отсутствовала.



**Рис. 1.** Территория исследований (справа красными границами выделено тестовое поле).

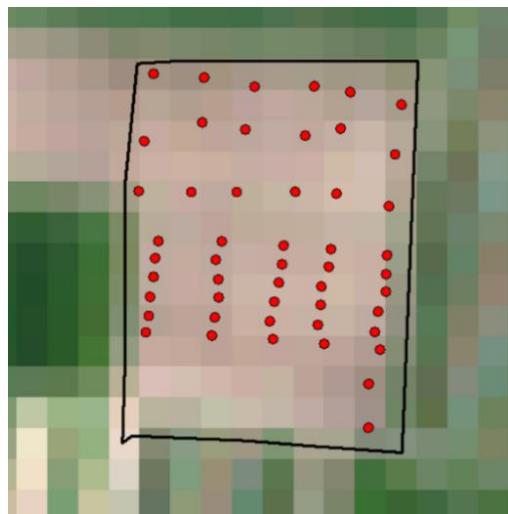
**Fig. 1.** Test field (within red boundary on the right).

На тестовом поле 15.05.2024 г. было отобрано 48 смешанных образцов поверхностного горизонта пахотных почв (0–5 см) (рис. 2).

В образцах определялись следующие показатели плодородия пахотных почв: pH в водной и солевой вытяжке, содержание органического вещества, массовая доля соединений фосфора, содержание обменного калия, обменных катионов по Шолленбергеру (кальций, магний), массовая доля азота нитратов. Анализы образцов проводились в ИЛЦ ФИЦ “Почвенный институт им. В.В. Докучаева”.

В точках отбора образцов проводилось полевое спектрометрирование поверхности почв. Для съемки спектральной отражательной способности (СОС) использовался полевой спектрорадиометр FieldSpec® HandHeld 2™ (“ASD Inc”, США), позволяю-

щий получать спектры отражения в диапазоне длин волн от 300 до 1025 нм с интервалом 2 нм. Съемка проводилась в малооблачную погоду в дневное время. В каждой точке опробования измерения проводились в 5-кратной повторности. Для съемки спектров открытой поверхности почвы прибор располагался на высоте 90–100 см над уровнем почвы. Полученные спектры осреднялись для каждой точки.



**Рис. 2.** Схема отбора образцов почв на тестовом поле.

**Fig. 2.** Soil sampling scheme.

Одновременно поверхность поля была отснята с использованием БПЛА DJI Matrice 200 с установленной на гиростабилизируемой подвеске камерой. Съемку осуществляли камерой Zenmuse X4S в видимом спектральном диапазоне (RGB). Основные характеристики камеры: матрица CMOS, 1"; число эффективных пикселей – 20 Мп; объектив F/2.8-11, 8.8 мм, FOV 84°. Для предполетной настройки коптера и камеры использовали приложение DJI GO 4, для автоматизированного построения маршрута полета и

осуществления аэрофотосъемки – приложение DroneDeploy.

Обработку данных аэрофотосъемки проводили с использованием специального программного обеспечения Agisoft Metashape Professional

([https://www.geoscan.aero/ru/software/agisoft/metashape\\_pro](https://www.geoscan.aero/ru/software/agisoft/metashape_pro)).

Полученное цветное изображение с пространственным разрешением 5 см на местности было разложено в ГИС ILWIS v.3.3 на три канала: R, G и B. После этого вокруг каждой точки отбора образцов (их положение было определено по характеру изображения, полученного с БПЛА) была построена буферная зона радиусом около 3 м. Для каждой зоны были рассчитаны средние и преобладающие значения тона изображения в каналах R, G и B.

Для анализа также использовались спутниковые данные, полученные 18 мая 2024 г. Атмосферно скорректированные спутниковые данные Sentinel-2 (продукты Level-2A) с пространственным разрешением 10 м на местности были получены с сайта: <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>. В исследование были включены 4-й, 3-й и 2-й каналы, приблизительно соответствующие каналам R, G и B используемого БПЛА.

Предобработка данных о спектральной отражательной способности почв заключалась в усреднении, удалении зашумленных участков и сглаживании. Для каждой точки на основе 5 повторностей рассчитывалась средняя спектральная кривая. При этом из-за зашумленности для анализа использовался только участок 350–900 нм, который захватывает видимый и ближний инфракрасный участки спектра. Сглаживание спектральных кривых осуществлялось фильтром Савицкого-Голея в программе R с помощью функции *savitzkyGolay* пакета *prospectr* (<https://cran.r-project.org/web/packages/prospectr/index.html>).

Далее для всех собранных дистанционных данных были рассчитаны спектральные индексы и спектральные отношения (табл. 1): 1) для спектрально генерализованных данных полевого спектрорадиометра; 2) для данных БПЛА на основе среднего и преобладающего значений отражения; 3) для спутниковых данных Sentinel-2.

**Таблица 1.** Использованные спектральные индексы

**Table 1.** Spectral indices used for the analysis

Индекс	Уравнение для данных спектрорадиометра и БПЛА	Уравнение с учетом каналов Sentinel-2	Ссылка на уравнение по данным Sentinel-2
BI	$\sqrt{\frac{(B^2 + G^2 + R^2)}{3}}$	$\sqrt{\frac{(Band2^2 + Band3^2 + Band4^2)}{3}}$	Mathieu et al., 1998
CI	$\frac{(R - G)}{(R + G)}$	$\frac{(Band4 - Band3)}{(Band4 + Band3)}$	Mathieu et al., 1998
HI	$\frac{(2 * R - G - B)}{(G - B)}$	$\frac{(2 * Band4 - Band3 - Band2)}{(Band3 - Band2)}$	Mathieu et al., 1998
SI	$\frac{(R - B)}{(R + B)}$	$\frac{(Band4 - Band2)}{(Band4 + Band2)}$	Mathieu et al., 1998
RI	$\frac{R^2}{(B * G^3)}$	$\frac{Band4^2}{(Band2 * Band3^3)}$	Mathieu et al., 1998
GSI	$\frac{(R - B)}{(R + B + G)}$	$\frac{(Band4 - Band2)}{(Band4 + Band3 + Band2)}$	Xiao et al., 2006
CRUST	$1 - \frac{(R - B)}{(R + B)}$	$1 - \frac{(Band4 - Band2)}{(Band4 + Band2)}$	Karnieli, 1997

**Примечание.** В – спектральная отражательная способность в синем участке спектра; Г – спектральная отражательная способность в зеленом участке спектра; Р – спектральная отражательная способность в красном участке спектра.

**Note.** B – the spectral reflectance in the blue region of the spectrum; G – the spectral reflectance in the green region of the spectrum; R – the spectral reflectance in the red region of the spectrum.

Моделирование зависимостей анализируемых свойств осуществлялось методом множественной линейной регрессии с помощью функции *lm* пакета *stats* программы R (<https://stat.ethz.ch/R-manual/R-devel/library/stats/html/stats-package.html>) и проводилось отдельно для данных, полученных с помощью полевого спектрорадиометра, БПЛА и Sentinel-2 по следующей схеме.

Сначала в модель включались все рассчитанные параметры, далее последовательно проводилось исключение параметров с уровнем значимости (p-value) более 0.05 до тех пор, пока в модели для каждого анализируемого свойства не оставались только статистически значимые параметры.

Отобранные таким образом информативные параметры затем использовались для моделирования параметров плодородия пахотных почв.

Для проверки полученных моделей проводилась процедура кросс-валидации. Выборка случайным образом делилась на 10 блоков, из которых один использовался для проверки, а остальные для обучения. Для устойчивости значений параметров оценки качества подобное деление повторялось 100 раз. Для кросс-валидации использовался пакет *caret* программы R (<https://cran.r-project.org/web/packages/caret/vignettes/caret.html>).

Основными параметрами для оценки качества моделей по результатам кросс-валидации являлись следующие: коэффициент детерминации ( $R^2_{cv}$ ), среднеквадратическая ошибка предсказания (RMSEcv) и отношение межквартильного размаха (IQR) к среднеквадратической ошибке предсказания (RPIQ).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В отобранных образцах pH солевой вытяжки варьирует от 4.20 до 5.06, а pH водной вытяжки – от 4.70 до 5.75 (табл. 2). Для данных свойств отмечается наименьший коэффициент вариации: 13.69 и 9.87% соответственно. Сильнее всего варьирует содержание обменных катионов магния – от 0.46 до 13.98 мг-экв/100 г с коэффициентом вариации 81.48%, а также содержание подвижного фосфора – от 24.10 до 760.20 мг/кг с коэффициентом вариации 79.75%.

**Таблица 2.** Параметры плодородия пахотных почв тестового поля  
**Table 2.** Arable soil fertility parameters

Параметры плодородия	Минимум	Среднее	Максимум	Стандартное отклонение	Коэффициент вариации
pH водной вытяжки	4.70	5.75	7.10	0.57	9.87
pH солевой вытяжки	4.20	5.06	6.70	0.69	13.69
Подвижный фосфор, мг/кг	24.10	146.35	760.20	116.71	79.75
Обменный калий, мг/кг	87.58	228.82	376.94	64.36	28.13
Массовая доля азота нитратов, млн <sup>-1</sup>	7.80	11.72	15.50	1.97	16.78
Органическое вещество, %	1.08	2.31	3.34	0.52	22.31
Обменные катионы кальция, мг-экв/100 г	3.13	11.04	41.57	5.85	52.95
Обменные катионы магния, мг-экв/100 г	0.46	3.61	13.98	2.94	81.48

Содержание обменных катионов кальция также колеблется достаточно сильно: от 3.13 до 41.57 мг-экв/100 г с коэффициентом вариации 52.95%. Содержание обменного калия варьирует в пределах от 87.58 до 376.94 мг/кг с коэффициентом вариации 28.13%, массовая доля азота нитратов – от 7.80 до 11.72 млн<sup>-1</sup> с коэффициентом вариации 16.78%. Содержание органического вещества изменяется в пределах от 1.08 до 3.34% с коэффициентом вариации 22.31%.

В целом, вне зависимости от используемых дистанционных данных, модели для тестового поля получились не очень высокого качества (табл. 3).  $R^2_{cv}$  варьировал от 0.24 до 0.40, RPIQ – от 0.86 до 1.62.

Что касается содержания органического вещества, статистически достоверная модель была получена только при использовании данных полевого спектрорадиометра.  $R^2_{cv}$  модели равен 0.28, RPIQ – 1.14. Такая же ситуация отмечается для pH солевой вытяжки и обменных катионов магния. Для pH солевой вытяжки  $R^2_{cv}$  модели, полученной по данным полевого спектрорадиометра, составил 0.36, RPIQ – 1.62. Для обменных катионов магния  $R^2_{cv}$  модели, полученной по данным полевого спектрорадиометра, составил 0.36, RPIQ – 0.86.

В случае содержания обменного калия статистически достоверные модели были получены только для данных БПЛА. При этом при использовании преобладающих значений отражения предсказательная способность модели оказалась чуть выше, чем при использовании средних значений.  $R^2_{cv}$  модели составил 0.36, RPIQ – 1.52.

Для содержания подвижного фосфора статистически достоверные модели удалось получить по данным полевого спектрорадиометра и БПЛА. Лучшая модель по величине  $R^2_{cv}$  и RPIQ была получена при использовании преобладающих значений отражения, рассчитанных по данным БПЛА ( $R^2_{cv} = 0.40$ , RPIQ = 1.33).

Что касается pH водной вытяжки, лучшая модель по величине  $R^2_{cv}$  была получена по данным полевого спектрорадиометра ( $R^2_{cv} = 0.37$ ), а по величине RPIQ – по спутниковым данным Sentinel-2 (RPIQ = 1.32).

**Таблица 3.** Моделирования параметров плодородия пахотных почв по дистанционным данным для тестового поля

**Table 3.** Models for arable soil parameters detection using remote sensing data

Свойства	Информативные параметры	$R^2_{cv}$	RMSEcv	RPIQ
<i>Данные, полученные с помощью полевого спектрорадиометра (генерализованные)</i>				
Органическое вещество	R, G, B, B/R, SI, BI	0.28	0.51	1.14
Обменный калий	не удалось получить статистически достоверной модели			
Подвижный фосфор	G, CI, BI, GSI	0.38	101.23	1.19
pH солевой вытяжки	B/G, B/R, CI	0.36	0.65	1.62
pH водной вытяжки	B/G, B/R, HI	0.37	0.58	1.21
Обменные катионы кальция	не удалось получить статистически достоверной модели			
Обменные катионы магния	CI	0.36	0.21	0.86
Массовая доля азота нитратов	не удалось получить статистически достоверной модели			

**Продолжение таблицы 3**

**Table 3 continued**

Свойства	Информативные параметры	$R^2_{cv}$	RMSEcv	RPIQ
<i>Данные, полученные с помощью БПЛА (среднее значение отражения)</i>				
Органическое вещество		не удалось получить статистически достоверной модели		
Обменный калий	SI	0.30	60.3	1.42
Подвижный фосфор	BI, RI	0.39	95.99	1.26
pH солевой вытяжки		не удалось получить статистически достоверной модели		
pH водной вытяжки	SI	0.33	0.53	1.32
Обменные катионы кальция		не удалось получить статистически достоверной модели		
Обменные катионы магния		не удалось получить статистически достоверной модели		
Массовая доля азота нитратов		не удалось получить статистически достоверной модели		

**Продолжение таблицы 3**

**Table 3 continued**

Свойства	Информативные параметры	$R^2_{cv}$	RMSEcv	RPIQ
<i>Данные, полученные с помощью БПЛА (преобладающее значение отражения)</i>				
Органическое вещество	не удалось получить статистически достоверной модели			
Обменный калий	B, G, B/G, B/R, CI	0.36	56.26	1.52
Подвижный фосфор	G, RI	0.40	90.98	1.33
pH солевой вытяжки	не удалось получить статистически достоверной модели			
pH водной вытяжки	R	0.26	0.54	1.30
Обменные катионы кальция	не удалось получить статистически достоверной модели			
Обменные катионы магния	не удалось получить статистически достоверной модели			
Массовая доля азота нитратов	B/G, SI	0.31	1.83	1.48

**Продолжение таблицы 3**

**Table 3 continued**

Свойства	Информативные параметры	$R^2_{cv}$	RMSEcv	RPIQ
<i>Данные, полученные с помощью Sentinel-2</i>				
Органическое вещество	не удалось получить статистически достоверной модели			
Обменный калий	не удалось получить статистически достоверной модели			
Подвижный фосфор	не удалось получить статистически достоверной модели			
pH солевой вытяжки	не удалось получить статистически достоверной модели			
pH водной вытяжки	B1	0.34	0.53	1.32
Обменные катионы кальция	не удалось получить статистически достоверной модели			
Обменные катионы магния	не удалось получить статистически достоверной модели			
Массовая доля азота нитратов	B/R, SI	0.27	1.94	1.39

**Примечание.** R, G, B – данные в соответствующих каналах БПЛА (соответствуют 4, 3 и 2 каналу Sentinel-2). В случае данных полевого спектрорадиометра – спектрально генерализованные данные в соответствующих каналах БПЛА. B/G, B/R – спектральные отношения отражения в соответствующих каналах. Формулы для расчета остальных параметров представлены в таблице 1.

**Note.** R, G, B – data in the corresponding UAV bands (corresponding to Sentinel-2 bands 4, 3, and 2). For field spectroradiometer data – spectrally generalized data in the corresponding UAV bands. B/G, B/R – spectral reflectance ratios in the corresponding bands. Formulas for calculating the remaining parameters are presented in Table 1.

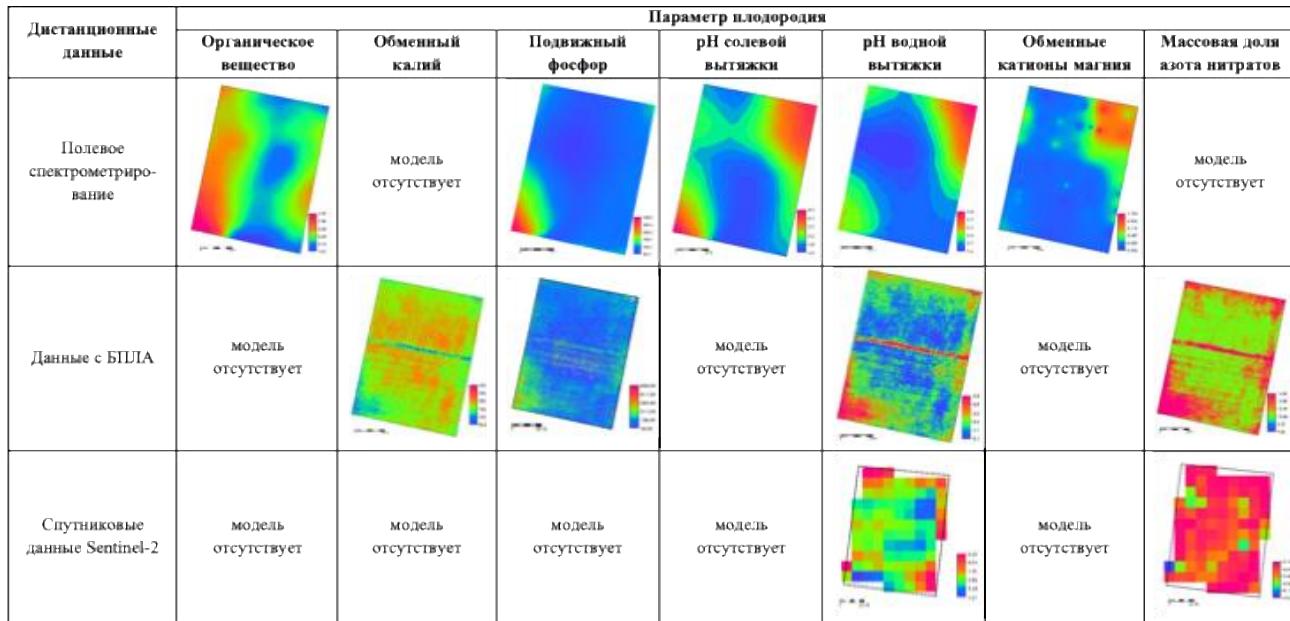
В случае обменных катионов кальция для анализируемого тестового поля не удалось получить статистически достоверной модели.

Для массовой доли азота нитратов лучшая модель была получена по данным БПЛА на основе преобладающего значения отражения.  $R^2_{cv}$  модели составил 0.31, RPIQ – 1.48. По данным БПЛА на основе среднего значения отражения и по данным полевого спектрометрирования для данного свойства не удалось получить статистически достоверной модели.

На рисунке 3 представлены карты отдельных свойств почвы, построенные на основе полученных регрессионных зависимостей (БПЛА и спутниковые данные) и на основе пространственной интерполяции данных измерений в точках методом скользящего среднего (данные спектрометрирования).

Судя по данным рисунка 3, данные полевого спектрометрирования позволили построить больше статистически значимых моделей с отдельными свойствами почв. Но на точность полученных на основе этих моделей карт, кроме качества самих моделей, сильное влияние оказывает используемый метод пространственной интерполяции точечных данных. Кроме того, практическое использование данного подхода сильно ограничивается его большой трудоемкостью. Для построения хороших моделей необходимы сотни точек с полевыми обследованиями (Докучаев и др., 2017).

Точность моделей, полученных по данным БПЛА, оказалась достаточно близкой к точности моделей, полученных по данным полевого спектрорадиометра. Но количество свойств, для которых удалось получить статистически достоверные модели сократилось. Поскольку съемка БПЛА выполнялась одновременно с полевым спектрометрированием, это позволило избежать влияния таких факторов, как состояние открытой поверхности пахотных почв (влажность, шероховатость, наличие корки (Persson, 2005; Прудникова и др., 2021)), а также разницы в условиях освещения (Xu et al. 2019). Так (Heil et al., 2022) отмечают, что данные факторы обуславливают разницу в качестве моделей, получаемых на основе данных БПЛА и спектральных данных, полученных в лабораторных условиях.



**Рис. 3.** Карты параметров плодородия почв тестового поля, построенные на основе дистанционных данных.  
**Fig. 3.** Maps of soil fertility parameters of the test field, modelled on the basis of remote sensing data.

В то же время избыточная детальность данных, получаемых с БПЛА, вероятно, негативно сказалась на качестве получаемых результатов. Влияние на изображение полос вспашки, а также растительных остатков, крупных камней на поверхности почвы приводит к падению точности получаемых карт. Именно поэтому в случае использования данных БПЛА чуть лучше оказались модели, полученные на основе преобладающих значений тонов изображения в отдельных каналах, а не среднего тона.

По-видимому, эти проблемы частично можно решить путем пространственного осреднения (генерализации) получаемых карт свойств почв, но оценка эффективности этого подхода требует дополнительных исследований.

Наименьшее количество моделей было построено с использованием спутниковых данных, что связано с их генерализованностью и сильным пространственным варьированием свойств почв на тестовом поле (Лозбенев и др., 2024). Конечно же, не может не вносить свой негативный вклад и влияние атмосферных условий съемки и качества предобработки спутниковых данных.

Разница в состоянии открытой поверхности пахотных почв во время полевых работ и во время получения спутниковых данных также может повлиять на результаты моделирования, как это было показано ранее (Prudnikova, Savin, 2021). Однако поскольку спутниковые данные были получены достаточно близко к дате полевых работ, вероятнее всего, различия были не очень существенными.

Отмечаемое невысокое качество регрессионных моделей может быть связано с ограниченным набором каналов, используемых при анализе, охватывающих только видимый диапазон спектра. Использование на БПЛА камеры, работающей также в ближнем инфракрасном или тепловом участке спектра, может позволить увеличить информативность получаемых данных (Грубина и др., 2020).

## ВЫВОДЫ

В ходе проведенных исследований было установлено, что наиболее точные модели для предсказания агрохимических свойств почв могут быть получены на основе полевого спектро-

метрирования, менее качественные модели получены с использованием данных БПЛА и наименее качественные модели – на основе спутниковых данных. Основной причиной этого результата, по-видимому, является пространственное варьирование агрохимических показателей почв и генерализованность изображения их поверхности на данных БПЛА и спутниковых снимках.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грубина П.Г., Савин И.Ю., Прудникова Е.Ю. Возможности использования данных тепловой съемки для детектирования основных параметров плодородия пахотных почв // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2020. Вып. 105. С. 146–172. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-105-146-172>.
2. Докучаев П.М., Жоголев А.В., Кириллова Н.П., Козлов Д.Н., Конюшкова М.В., Лозбенев Н.И., Мартыненко И.А., Мешалкина Ю.Л., Прудникова Е.Ю., Самсонова В.П. Цифровая почвенная картография. М.: РУДН, 2017. 152 с.
3. Лозбенев Н.И., Козлов Д.Н., Филь П.П., Хитров Н.Б., Шилов П.М. Оценка влияния вида угодья и почвообразующих пород на содержание и запасы органического углерода в мелиорированных дерновоподзолистых почвах, Тверская область // Почвоведение. 2024. № 12. С. 1705–1735.
4. Методические указания по проведению комплексного мониторинга плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения. М.: ФГНУ “Росинформагротех”, 2003. 240 с.
5. Прудникова Е.Ю., Савин И.Ю., Лебедева М.П., Волков Д.С., Рогова О.Б., Варламов Е.Б., Абросимов К.Н. Трансформация поверхностного слоя пахотного горизонта почв под влиянием атмосферных осадков // Почвоведение. 2001. № 11. С. 1407–1420.
6. Савин И.Ю., Столбовой В.С., Иванов А.Л., Прудникова Е.Ю., Жоголев А.В., Воронин А.Я. Технологии составления и обновления почвенных карт. М.: Издательство “Перо”, 2019. 328 с.
7. Савин И.Ю., Симакова М.С. Спутниковые технологии для инвентаризации и мониторинга почв в России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 5. С. 104–115.
8. Ben-Dor E., Banin A. Near-infrared analysis as a rapid method to simultaneously evaluate several soil properties // Soil Sci. Soc. Am. J. 1995. Vol. 59(2). P. 364–372.

9. *Heil J., Jörges C., Stumpe B.* Fine-scale mapping of soil organic matter in agricultural soils using uavs and machine learning // *Remote Sens.* 2022. Vol. 14. 3349.
10. *Karnieli A.* Development and implementation of spectral crust index over dune sands // *International Journal of Remote Sensing.* 1997. Vol. 18. P. 1207–1220.
11. *Mathieu R., Pouget M., Cervelle B., Escadafal R.* Relationships between satellite-based radiometric indices simulated using laboratory reflectance data and typic soil color of an arid environment // *Remote sensing of environment.* 1998. Vol. 66. P. 17–28.
12. *Nyéki A., Daróczy B., Kerepesi C., Neményi M., Kovács A.J.* Spatial variability of soil properties and its effect on maize yields within field – a case study in Hungary // *Agronomy.* 2022. Vol. 12(2). 395. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy12020395>.
13. *Persson M.* Estimating surface soil moisture from soil color using image analysis // *Vadose Zone J.* 2005. Vol. 4. P. 1119–1122.
14. *Prudnikova E., Savin I.* Some peculiarities of arable soil organic matter detection using optical remote sensing data // *Remote Sensing.* 2021. Vol. 13(12). 2313.
15. *Viscarra Rossel R.A., Walvoort D.J.J., McBratney A.B., Janik L.J., Skjemstad J.O.* Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties // *Geoderma.* 2006. Vol. 131. P. 59–75.
16. *Wetterlind J., Stenberg B., Söderström M.* Increased sample point density in farm soil mapping by local calibration of visible and near infrared prediction models // *Geoderma.* 2010. Vol. 156 (3–4). P. 152–60.
17. *Xiao J., Shen, Y., Tateishi R., Bayaer W.* Development of topsoil grain size index for monitoring desertification in arid land using remote sensing // *International Journal of Remote Sensing.* 2006. Vol. 27. P. 2411–2422.
18. *Xu L., Zheng C.L., Wang Z.C., Nyongesah M.J.* A digital camera as an alternative tool for estimating soil salinity and soil surface roughness // *Geoderma.* 2019. Vol. 341. P. 68–75.

## REFERENCES

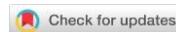
1. Grubina P.G., Savin I.Yu., Prudnikova E.Yu., The possibilities of using thermal infrared imaging data for detecting the main parameters of arable soil fertility, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2020, Vol. 105, pp. 146–172. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-105-146-172>.
2. Dokuchaev P.M., Zhogolev A.V., Kirillova N.P., Kozlov D.N., Konyushkova M.V., Lozbenev N.I., Martynenko I.A., Meshalkina Yu.L.,

- Prudnikova E.Yu., Samsonova V.P., *Tsifrovaya pochvennaya kartografiya* (Digital soil mapping), Moscow: RUDN, 2017, 152 p.
3. Lozbenev N.I., Kozlov D.N., Fil' P.P., Khitrov N.B., Shilov P.M., Otsenka vliyaniya vida ugod'ya i pochvoobrazuyushchikh porod na soderzhanie i zapasy organicheskogo ugleroda v meliorirovannykh derno-vopodzolistykh pochvakh, Tverskaya oblast' (Assessment of the influence of the type of site and soil-forming rocks on the content and stocks of organic carbon in ameliorated sod-podzolic soils, Tver region), *Pochvovedenie*, 2024, No. 12, pp. 1705–1735.
4. *Metodicheskie ukazaniya po provedeniyu kompleksnogo monitoringa plodorodiya pochv zemel' sel'skokhozyaistvennogo naznacheniya* (Methodological guidelines for comprehensive monitoring of soil fertility of agricultural lands), Moscow: FGNU "Rosinformagrotekh", 2003, 240 p.
5. Prudnikova E.Yu., Savin I.Yu., Lebedeva M.P., Volkov D.S., Rogova O.B., Varlamov E.B., Abrosimov K.N., Transformatsiya poverkhnostnogo sloya pakhotnogo gorizonta pochv pod vliyaniem atmosfernykh osadkov (Transformation of the surface layer of the arable soil horizon under the influence of atmospheric precipitation), *Pochvovedenie*, 2001, No. 11, pp. 1407–1420.
6. Savin I.Yu., Stolbovoi V.S., Ivanov A.L., Prudnikova E.Yu., Zhogolev A.V., Voronin A.Ya., *Tekhnologii sostavleniya i obnovleniya pochvennykh kart* (Technologies of compilation and updating of soil maps), Moscow: Izdatel'stvo "Pero", 2019, 328 p.
7. Savin I.Yu., Simakova M.S., Sputnikovye tekhnologii dlya inventarizatsii i monitoringa pochv v Rossii (Satellite technologies for soil inventory and monitoring in Russia), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 5, pp. 104–115.
8. Ben-Dor E., Banin A., Near-infrared analysis as a rapid method to simultaneously evaluate several soil properties, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1995, Vol. 59 (2), pp. 364–372.
9. Heil J., Jörges C., Stumpe B., Fine-scale mapping of soil organic matter in agricultural soils using uavs and machine learning, *Remote Sens.*, 2022, Vol. 14, 3349.
10. Karnieli A., Development and implementation of spectral crust index over dune sands, *International Journal of Remote Sensing*, 1997, Vol. 18, pp. 1207–1220.
11. Mathieu R., Pouget M., Cervelle B., Escadafal R., Relationships between satellite-based radiometric indices simulated using laboratory reflectance data and typic soil color of an arid environment, *Remote sensing of environment*, 1998, Vol. 66, pp. 17–28.

12. Nyéki A., Daróczy B., Kerepesi C., Neményi M., Kovács A.J., Spatial variability of soil properties and its effect on maize yields within field – a case study in Hungary, *Agronomy*, 2022, Vol. 12 (2), 395, DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy12020395>.
13. Persson M., Estimating surface soil moisture from soil color using image analysis, *Vadose Zone J.*, 2005, Vol. 4, pp. 1119–1122.
14. Prudnikova E., Savin I., Some peculiarities of arable soil organic matter detection using optical remote sensing data, *Remote Sensing*, 2021, Vol. 13 (12), 2313.
15. Viscarra Rossel R.A., Walvoort D.J.J., McBratney A.B., Janik L.J., Skjemstad J.O., Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties, *Geoderma*, 2006, Vol. 131, pp. 59–75.
16. Wetterlind J., Stenberg B., Söderström M., Increased sample point density in farm soil mapping by local calibration of visible and near infrared prediction models, *Geoderma*, 2010, Vol. 156 (3–4), pp. 152–60.
17. Xiao J., Shen, Y., Tateishi R., Bayaer W., Development of topsoil grain size index for monitoring desertification in arid land using remote sensing, *International Journal of Remote Sensing*, 2006, Vol. 27, pp. 2411–2422.
18. Xu L., Zheng C.L., Wang Z.C., Nyongesah M.J., A digital camera as an alternative tool for estimating soil salinity and soil surface roughness, *Geoderma*, 2019, Vol. 341, pp. 68–75.

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2025-126-90-116



**Ссылки для цитирования:**

Моргач Ю.Р., Сухачева Е.Ю. Особенности структуры почвенного покрова горнопромышленных комплексов Ленинградской области // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2025. Вып. 126. С. 90-116. DOI: 10.19047/0136-1694-2025-126-90-116

**Cite this article as:**

Morgach Yu.R., Sukhacheva E.Yu., Features of soil cover structures of mining and industrial complexes in the Leningrad Oblast, Dokuchaev Soil Bulletin, 2025, V. 126, pp. 90-116, DOI: 10.19047/0136-1694-2025-126-90-116

## **Особенности структуры почвенного покрова горнопромышленных комплексов Ленинградской области**

© 2025 г. Ю. Р. Моргач<sup>1\*</sup>, Е. Ю. Сухачева<sup>1,2\*\*</sup>

<sup>1</sup>Центральный музей почвоведения им. В. В. Докучаева – филиал ФИЦ “Почвенный институт им. В. В. Докучаева”, Россия, 197375, Санкт-Петербург, Биржевой проезд, д. 6,

<sup>\*</sup><https://orcid.org/0000-0002-2422-8638>, e-mail: [tima204@yandex.ru](mailto:tima204@yandex.ru).

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Россия, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7–9,

<sup>\*\*</sup><https://orcid.org/0000-0003-3612-6265>, e-mail: [lenasoil@mail.ru](mailto:lenasoil@mail.ru).

Поступила в редакцию 13.12.2024, после доработки 16.05.2025,  
принята к публикации 13.11.2025

**Резюме:** Исследования почв и почвенного покрова проводились на территории горнопромышленных комплексов по добыче гранита, песка и песчано-гравийной смеси, глины и на торфоразработках. Разработка месторождений полезных ископаемых приводит к кардинальному изменению почв и почвенного покрова (ПП), к появлению новых почвенных разностей и не имеющих аналогов в естественных ландшафтах структур почвенного покрова (СПП). Ареалы антропогенно-преобразованных почв, непочвенных образований и вновь формирующихся почвенных комбинаций на таких территориях часто имеют геометрически правильную форму. В местах, где естественный ПП был полностью уничтожен (выработка карьера), образуется водоем

или новые неконтрастные СПП наиболее близкие к естественным ташетам, компонентами которых являются слаборазвитые почвы. Вдоль подъездных грунтовых дорог к карьерам, в зависимости от добываемого ископаемого, формируются различные формы новых антропогенных СПП. Для торфоразработок характерны регулярно-ячеистые прямоугольные формы почвенных комбинаций, обусловленные технологией добычи торфа. На территории карьера по добыче глины формируются СПП близкие к естественным сложным мозаикам. Выявленные СПП, формирующиеся на территории горнопромышленных комплексов, в большинстве случаев не имеют аналогов среди естественных, и для целей картографирования этих территорий, а также оценки изменения экологических функций почв антропогенно-преобразованных территорий требуется дальнейшая проработка типологии антропогенных СПП.

**Ключевые слова:** антропогенно-преобразованные почвы; почвенные комбинации; карьеры; почвенное картографирование.

## Features of soil cover structures of mining and industrial complexes in the Leningrad Oblast

© 2025 Yu. R. Morgach<sup>1\*</sup>, E. Yu. Sukhacheva<sup>1,2\*\*</sup>

<sup>1</sup>V.V. Dokuchaev Central Soil Museum, Branch of the Federal Research Centre “V.V. Dokuchaev Soil Science Institute”,

6 Birzhevoy proezd, Saint Petersburg 199034, Russian Federation,

\*<https://orcid.org/0000-0002-2422-8638>, e-mail: [tima204@yandex.ru](mailto:tima204@yandex.ru).

<sup>2</sup>Saint Petersburg University,

7–9 Universitetskaya Embankment, Saint Petersburg 199034,

Russian Federation,

\*\*<https://orcid.org/0000-0003-3612-6265>, e-mail: [lenasoil@mail.ru](mailto:lenasoil@mail.ru).

Received 13.12.2024, Revised 16.05.2025, Accepted 13.11.2025

**Abstract:** Studies of soils and soil cover were conducted in the territory of mining complexes for the extraction of granite, sand and sand-gravel mixture, clay and peat mining. The development of mineral deposits leads to cardinal changes in soils and soil cover (SC), to the appearance of new soil varieties and soil cover structures (SCS) that have no analogues in natural landscapes. The areas of anthropogenically transformed soils, non-soil formations and newly formed soil combinations in such areas often have a geometrically regular shape. In places where natural SC has been completely destroyed

(quarry excavation), a water body or new non-contrasting SCS are formed, which are closest to natural tachets and whose components are underdeveloped soils. Along the access roads to the quarries, depending on the extracted minerals, different forms of new anthropogenic SCS are formed. The access road to the sand pit does not have high shoulders fixed by vegetation cover, which allows the formation of a two-way relationship, manifested in the transfer of sandy material from the road surface to the shoulders (stratified soils) and in the opposite direction. Peat mining is characterized by regular-cellular rectangular forms of soil combinations due to peat extraction technology. On the territory of the clay quarry, SCS close to natural mosaics are formed. The identified SCS formed on the territory of mining-industrial complexes in most cases have no analogues among natural ones, and for the purposes of mapping these territories, as well as assessing changes in the ecological functions of soils of anthropogenically transformed territories, further development of the typology of anthropogenic SCS is required.

**Keywords:** anthropogenically transformed soils; soil combinations; quarries; soil mapping.

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время изучению структуры почвенного покрова (СПП) уделяется недостаточно внимания, несмотря на то что такие исследования крайне необходимы в условиях значительной трансформации почвенного покрова под влиянием человека. Выявление разнообразия почвенного покрова, определение характеристик и особенностей новых типов СПП, которые не имеют естественных аналогов, а также их отображение на почвенных картах являются актуальными задачами современности (Сухачева, 2024).

Известно, что отправной точкой для активного развития учения о СПП стала монография В.М. Фридланда (Фридланд, 1972). С 1973 по 1998 гг. в журнале “Почвоведение” было опубликовано более 70 статей, посвященных СПП. В последующие десятилетия интерес к этой теме снизился практически в 10 раз. При этом анализ поискового запроса в eLIBRARY.RU показал следующую динамику – постепенное уменьшение количества работ, посвященных исследованию СПП в естественных ландшафтах, с увеличением интереса к изучению СПП в агроландшафтах. В последние годы стали появляться немногочисленные работы, посвященные методологии исследований СПП территорий, преобра-

зованных в результате строительства городов, прокладки газо- и нефтепроводов, ЛЭП, разработки карьеров. Однако в большинстве работ объектом исследований является ПП урбанизированных территорий (Хитров, 2010; Парамонова, 2010; Сухачева, 2019). Работы, посвященные изучению СПП горнопромышленных комплексов, практически отсутствуют (Timofeeva, 2021).

Карьеры занимают относительно небольшие площади, но они являются наиболее экологически неблагополучными территориями с максимально нарушенными функциями почв. Горнодобывающая промышленность уничтожает целые природные экосистемы на локальных участках, нарушая ландшафтное разнообразие целых регионов. При разработке месторождений часто полностью уничтожается растительность, почвы, изменяются гидрогеологические условия, формируются новые антропогенные формы рельефа (карьеры, отвалы, терриконы, овраги) и новые СПП.

Целью работы являлась характеристика компонентов почвенного покрова территорий различных горнопромышленных комплексов и выявление особенностей формирования новых СПП.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектами исследования являются почвы и ПП горнопромышленных комплексов Ленинградской области (рис. 1). Минерально-сыревая база региона включает множество крупных карьеров по добыче различных полезных ископаемых, площадь которых увеличивается ежегодно.

Разнообразие месторождений обусловлено геологическим строением территории Ленинградской области. Значительная часть региона находится на Восточно-Европейской равнине. Здесь распространены месторождения песков и песчано-гравийной смеси (ПГС). Они приурочены к ледниковым отложениям, образующим различные ледниковые формы рельефа – озера, камы, зан드ровые равнины.

Часть территории области расположена в пределах Балтийского кристаллического щита. На севере Карельского перешейка выходят на поверхность граниты, гнейсы и гранито-гнейсы. Здесь находятся карьеры по их добыче. В северо-восточной части области на уступе к Онежскому озеру уже не первое десятилетие добы-

вают габбро-нориты.

Месторождения карбонатных пород приурочены к Ордовикскому плато, которое простирается в широтном направлении с востока на запад (Беляев, 2022). На востоке области добывают бокситы, а на западе региона расположены месторождения горючих сланцев, сформировавшиеся примерно 400 млн лет назад, во время ордовикского периода.

Ленинградская область сильно заболочена. Наиболее крупные болотные территории распространены на востоке области, где в районе Приладожья находятся большие массивы торфоразработок (Пестряков, 1973). Также торф добывают на Привуоксинской низменности на севере области и в центральной части в Приневской низменности. На территории Ленинградской области был обследован ПП различных горнопромышленных предприятий. Горнопромышленным комплексом принято считать “целенаправленное сочетание предприятий и производств по эффективной комплексной добыче и переработке минерального сырья одного или нескольких месторождений, расположенных в пределах определенной территории и связанных между собой тесными производственно-технологическими связями” (Пахомов, 1989). Таким образом, в границы наших исследований входила собственно выработка (сухая или затопленная); выработанные карты (на торфоразработках); борта карьеров, которые часто имеют ступенчатую форму; отвалы; а также прилегающая территория, затронутая антропогенным воздействием, в том числе подъездные дороги и дренажная сеть.

Для выявления особенностей влияния технологических процессов добычи полезных ископаемых на ПП были проведены полевые исследования и анализ космоснимков территории 22 горнопромышленных комплексов: 3 карьеров по добыче гранита, 9 – по добыче песка и ПГС, 3 – торфоразработок, 2 – по добыче сланцев и известняка и по одному карьеру по добыче габбро, бокситов, глины.

На территории всех горнопромышленных комплексов было выявлено значительное разнообразие почвенных разностей (естественных и антропогенно-преобразованных), дана характеристика почвенных ареалов и непочвенных образований (НПО), особое

внимание при исследовании было уделено выявлению взаимосвязей между компонентами ПП.

Для иллюстрации выявленных закономерностей в статье рассмотрен ПП территории горнорудных комплексов по добыче четырех полезных ископаемых: гранита, песка и ПГС, глины и торфа (рис. 1).

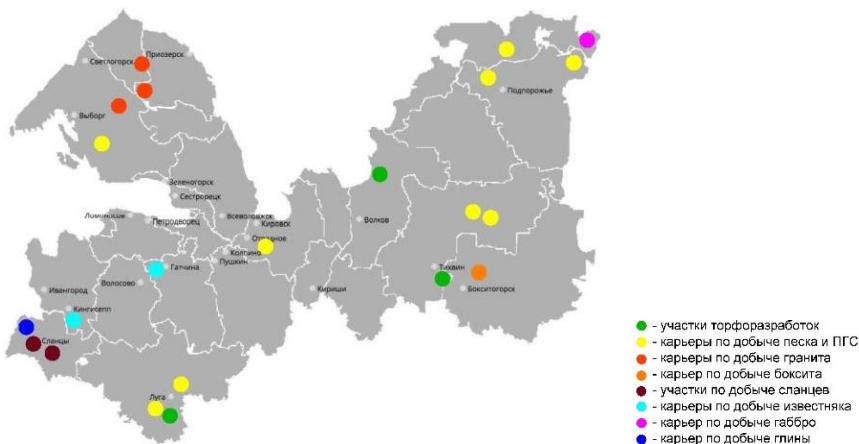


Рис. 1. Расположение объектов исследования.

Fig. 1. Location of the study objects.

Учитывая, что СПП является сложной системой, состоящей из многократного повторения одного или нескольких основных элементов (Фридланд, 1972), в границах горнорудных комплексов были заложены ключевые участки размером 100 × 50 м, представляющие наиболее характерные типы формирующихся антропогенных СПП.

Выбор местоположения и границ ключевых участков был обусловлен следующими факторами:

- наличие на выбранной территории характерных трансформаций ПП, связанных с технологией добычи;
- в границы участков не включались ареалы естественных

почв, не измененных под влиянием антропогенного фактора.

В основу исследований СПП территорий горнорудных комплексов была положена концепция В.М. Фридланда. При надлежность к хорошо известным по литературе типам СПП (комплексам, пятнистостям, сочетаниям, вариациям, мозаикам и ташетам) в настоящем исследовании определялась характером межкомпонентных связей и контрастностью компонентов ПП. Учитывалось также то, что согласно типологии антропогенно-преобразованных СПП (Сухачева и др., 2019), с одной стороны, они могут частично соответствовать определенным типам СПП в естественных ландшафтах, а с другой – значительно отличаются по своим характеристикам от таковых в природных условиях.

Учитывая, что ПП исследованных участков значительно преобразован в результате мощного антропогенного воздействия, при характеристике почв была использована “Классификация и диагностика почв России” (Шишов, 2004). Это позволило отобразить практически все разнообразие антропогенно-преобразованных почв. Также в пределах горнорудных комплексов выявлены водные объекты, дороги, выходы горных пород, отвалы, промышленные объекты. Все они были объединены общим термином – непочвенные образования (НПО). Термин ТПО (Шишов, 2004) практически не использовался, так как он имеет более узкое значение. Названия естественных почв, которые находились на территории карьеров до начала антропогенного воздействия, даны по литературным данным в соответствии с “Классификацией и диагностикой почв СССР” (Егоров, 1977).

Исследованные карьеры по добыче гранита находятся на северо-западе Ленинградской области в Приозерском и Выборгском районах. Рельеф территории – плосковершинные гряды (сельги, сложенные кристаллическими породами или рыхлыми ледниково-вымытими отложениями) около 1.5 км в основании, возвышающиеся над дном ложбин, выстланных тяжелыми суглинками и ленточными глинами.

В условиях сельгового рельефа формируются дерново-подзолистые почвы различной степени оглеения, подзолистые, болотные, грубогумусовые буровоземы, подбуры и примитивные органо-литогенные (Касаткина, 1993). Пространственная неодно-

родность почвенного покрова сельского ландшафта обусловлена различиями рельефа и почвообразующих пород. СПП представлено сложными сочетаниями-мозаиками, состоящими из более простых почвенных комбинаций в различных частях рельефа (Гагарина и др., 1995).

В камовом рельефе в Тосненском районе на юге области был изучен ПП вокруг карьера по добыче песка и ПГС. В настоящее время образовавшаяся карьерная выработка затоплена грунтовыми водами. ПП камовых холмов до антропогенного воздействия был представлен подбурами и дерново-подбурами (Пестряков, 1973), что подтверждается картой реконструкцией почвенно-го покрова Ленинградской области (Сухачева, 2020).

Еще один объект, связанный с добычей песка, – это отвалы действующего карьера на востоке Ленинградской области в Подпорожском районе. Участок расположен на озерно-ледниковой равнине, для которой характерны вариации и сочетания подзолов глееватых, торфяно-подзолов глеевых и торфяно-глеевых почв (Пестряков, 1973).

На западе Ленинградской области изучен ПП горнодобывающего комплекса по добыче глины. Участок расположен на озерно-ледниковой равнине, где на дренируемых территориях расположены дерново-подзолистые поверхности-иллювиально-железистые песчаные почвы в сочетании с болотными (Гагарина и др., 1995).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ ПП горнопромышленных комплексов показал, что он значительно отличается от ПП естественных ландшафтов Ленинградской области. Несмотря на схожие тенденции трансформации ПП на всех изученных территориях, особенности почвенного покрова зависят от типа добываемого полезного ископаемого.

### **Почвенный покров ключевого участка на территории горно-промышленного комплекса “Гранит-Кузнецкое”**

В горнопромышленном комплексе “Гранит-Кузнецкое”, расположенному в Приозерском районе Ленинградской области на

Карельском перешейке, добыча гранита производится с 1954 г. В состав предприятия входит 3 действующих карьера площадью более 2.5 км<sup>2</sup> (карьер “Кузнечное”, “Кузнечное-1”, “Ровное-1”) и промышленные площадки (комплексы дробильно-сортировочного оборудования).

По результатам полевого обследования было установлено, что трансформация естественного ПП на территории комплекса происходит по трем направлениям: полное уничтожение почв на месте выработок; частичное уничтожение и значительное преобразование ПП вдоль грунтовых подъездных дорог и на технологических площадках; и незначительная стратификация естественных почв в результате запыления в направлении “розы ветров” от карьеров и вдоль подъездных дорог.

Ключевой участок был заложен на подъезде к выработке в северо-западной части карьера “Кузнечное-1”. Участок пересекает автомобильная грунтовая дорога, по которой осуществляется транспортировка вскрышного материала, заброшенная площадка для складирования щебня, подъездная грунтовая дорога к площадке и территория с сохранившимися слабоизмененными естественными почвами и лесной растительностью вдоль дороги (рис. 2).



**Рис. 2.** Расположение участка исследования и часть территории ключевого участка.

**Fig. 2.** Location of the study site.

По контрастности между компонентами ПП и их взаимосвязи на ключевом участке нами было выделено два типа СПП.

На месте складирования отсева дробления гранитной крошки формируются слаборазвитые почвы – петроземы, состоящие из подстильочно-торфяного горизонта, залегающего на мелкоземисто-щебнистой толще (рис. 3). Зарастанье таких территорий происходит крайне медленно (Абакумов, 2003). Под пятнами мхов и лишайников и редким подростом, состоящим из осины, сосны и бересклета, формируются петроземы гумусовые. Петроземы и петроземы гумусовые занимают наибольшую площадь ключевого участка (51.2% от общей площади) и образуют ташет, главным фактором формирования которого выступает смена растительности (табл. 1).

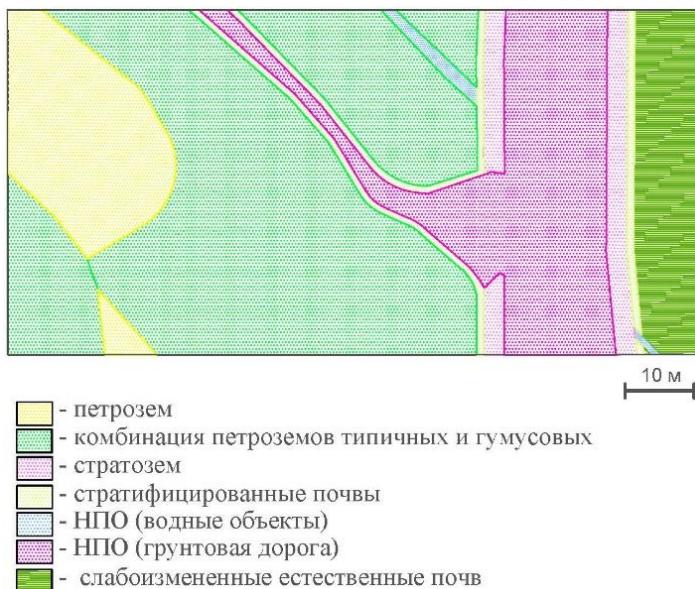
Второй тип СПП, выявленный на участке, не имеет аналогов в естественном ПП. Его компонентами являются – слабоизмененные естественные почвы (дерново-подзолистые почвы с привнесенной пылью на поверхность), стратоземы и НПО (дорога).

Слабоизмененные дерново-подзолистые почвы на ключевом участке расположены вдоль дороги под естественной лесной растительностью. На поверхности этих почв отмечается “запыленность”, однако мощность слоя пыли менее 1 см, что не дает возможности выделить стратифицированный подтип. На их долю приходится около 9% от общей площади ключевого участка (рис. 3).

Стратоземы диагностированы вдоль дороги на искусственно созданных возвышениях – линейных формах рельефа высотой от 0.4 м до 0.9 м и шириной до 3 м. Они были сформированы при строительстве дороги и состоят из привнесенного гумусированного и органо-минерального материала с включениями фрагментов гранита. Мощность верхнего горизонта более 40 см, что позволяет диагностировать их как стратоземы, а их ареалы имеют правильную геометрическую линейную форму и занимают более 5% участка.

Дорога является непочвенным образованием и, по существу, ее можно не рассматривать компонентом ПП. В то же время именно строительство дороги повлияло на образование стратоземов, а пыль с дорожного покрытия оказывает постоянное воздействие на почвы, расположенные вдоль дороги. Таким образом,

существует тесная взаимосвязь между ареалами “запыленных” почв и дорогой.



**Рис. 3.** Почвенный покров ключевого участка горнопромышленного комплекса “Гранит-Кузнецкое”.

**Fig. 3.** Key site at the Granit-Kuznechnoye mining complex.

Между стратоземами и слабоизмененными естественными почвами также формируется устойчивая односторонняя связь, проявляющаяся в поступлении влаги и растворов с насыпи на поверхность дерново-подзолистых почв (табл. 1). Следовательно, по своему генезису и контрастности формирующаяся почвенная комбинация соответствует сочетаниям, однако, по форме рельефа, размерам почвенных ареалов и их характеристикам она не соответствует естественным аналогам. Если в эту комбинацию включать ареал НПО, то ее можно охарактеризовать как сложное сочетание-мозаику.

**Таблица 1.** Структура почвенного покрова участков горнoprомышленных комплексов  
**Table 1.** Structure of soil cover of mining complexes sites

Почвенная комбинация	Компоненты комбинации	Контрастность компонентов	Преобладающая связь	Фактор формирования	Форма комбинации	Отличие формируемого СПП от СПП по Фридланду
Карьер: гранитный Участок: площадка для складирования гранитной крошки						
Ташет	Петрозем, Петрозем гумусовый	Неконтрастный	Отсутствует	Смена растительности	Изоморфная	Без значительных различий
Карьер: гранитный Участок: подъездная грунтовая дорога к карьеру						
Сложная мозаика-сочетание	Слабоизмененные естественные почвы, Стратозем, НПО	Контрастный	Односторонняя	Смена породы, перераспределение влаги	Линейная	- Вновь формируемые почвы после антропогенного воздействия - форма комбинации

**Продолжение таблицы 1**

Table 1 continued

Почвенная комбинация	Компоненты комбинации	Контрастность компонентов	Преобладающая связь	Фактор формирования	Форма комбинации	Отличие формируемого СПП от СПП по Фридланду
Карьер: песчаный Участок: подъездная грунтовая дорога к карьеру						
Комплекс	Стратифицированные почвы (с признаками стратификации), НПО	Контрастный	Двусторонняя	Микрорельеф	Линейная	- Вновь формируемые почвы после антропогенного воздействия; - форма комбинации
Карьер: песчаный Участок: мелиоративная сеть (дно канавы)						
Вариация	Абраземы альфагумусовые, Абраземы стратифицированные	Неконтрастный	Односторонняя	Микрорельеф	Линейная	- Вновь формируемые почвы после антропогенного воздействия; - рельеф; - форма комбинации

**Продолжение таблицы 1**

Table 1 continued

Почвенная комбинация	Компоненты комбинации	Контрастность компонентов	Преобладающая связь	Фактор формирования	Форма комбинации	Отличие формируемого СПП от СПП по Фридланду
Карьер: песчаный Участок: мелиоративная сеть (кавальер канавы)						
Сложное сочетание						
	Подбур стратифицированный, Вариация абраузема альфегумусового и абраузема стратифицированного	Контрастный	Односторонняя	Микрорельеф	Линейная	- Вновь формируемые почвы после антропогенного воздействия; - рельеф; - форма комбинации
Карьер: песчаный Участок: отвал						
Ташет	Псаммозем, Псаммозем гумусовый, Псаммозем оподзоленный	Неконтрастный	Отсутствует	Смена растительности	Изоморфная	Вновь формируемые почвы после антропогенного воздействия

**Продолжение таблицы 1**

Table 1 continued

Почвенная комбинация	Компоненты комбинации	Контрастность компонентов	Преобладающая связь	Фактор формирования	Форма комбинации	Отличие формируемого СПП от СПП по Фридланду
Карьер: торфоразработки Участок: выработанный участок						
Мозаика-сочетание	Стратифицированные торфяные почвы, стратоземы на торфе, НПО, торфяные почвы на остаточном торфе	Контрастный	Выраженная односторонняя	Смена породы, перераспределение влаги	Прямоугольная	- Вновь формируемые почвы после антропогенного воздействия; - форма комбинации
Карьер: глина Участок: начальный этап разработки участка (мелиоративная канава)						
Сочетание	Подзол, абрадированный подзол, НПО	Контрастный	Односторонняя	Смена породы, микрокомбинация	Прямоугольная	- Вновь формируемые почвы после антропогенного воздействия; - рельеф; - форма комбинации

**Продолжение таблицы 1**

**Table 1 continued**

Почвенная комбинация	Компоненты комбинации	Контрастность компонентов	Преобладающая связь	Фактор формирования	Форма комбинации	Отличие формируемого СПП от СПП по Фридланду
Карьер: глина Участок: начальный этап разработки участка (выровненная площадка)						
Ташет	Псаммозем, стратифицированный подзол, НПО	Неконтрастный	Отсутствует	Смена растительности	Изоморфная	- Вновь формируемые почвы после антропогенного воздействия; - форма комбинации
Карьер: глина Участок: начальный этап разработки участка (подъездная дорога)						
Мозаика	НПО, Стратифицированный абразем альфегумусовый глеевый, Псаммозем	Контрастный	Отсутствует	Смена породы	Прямоугольная	- Вновь формируемые почвы после антропогенного воздействия; - форма комбинации

## **Почвенный покров горнодобывающих комплексов по добыче песка и ПГС**

### *Почвенный покров ключевого участка на территории горнодобывающего комплекса “Шапкинский”*

Шапкинский карьер располагается в массиве холмисто-котловинного камового рельефа (Пестряков, 1973). Разработка карьеров осуществлялась с начала XIX в. В настоящее время горнодобывающий комплекс представлен шестью карьерами общей площадью около 70 га. В результате добычи песка естественный ландшафт значительно изменился – на месте камовых холмов образовались отрицательные формы рельефа в виде карьерных выемок, заполненных водой. Часть карьеров в настоящее время используется в рекреационных целях.

При полевом исследовании территории выявлено несколько типов антропогенно-преобразованных СПП, образование которых связано с технологией добычи песка, особенностями зарастания и рекреацией.

Ключевой участок был заложен в непосредственной близости от заброшенного в настоящее время карьера и включил в себя часть склона выработки, подъездную грунтовую дорогу и фрагмент мелиоративной сети.

Крутизна склона выработки более 30°, без признаков зарастания, поэтому этот контур был выделен как НПО.

Развитие новой СПП выявлено вдоль подъездной грунтовой дороги. Проезжая часть дороги представлена НПО, а обочины – подбурами с признаками стратификации (верхняя часть сформирована привнесенным материалом мощностью от 2 см до 5 см). Если ареал проезжей части (НПО) считать одним из компонентов почвенной комбинации, то обнаруживается двусторонняя связь между линейным ареалом подбура с признаками стратификации, занимающего незначительное возвышение вдоль дороги, и ареалом НПО (дорога). Материал с возвышенной обочиной с атмосферными осадками смыывается вниз на слабоизмененные естественные почвы и на дорогу, а с поверхности дороги под влиянием автотранспорта он вновь переносится на прилегающую территорию. Таким образом формируется линейная контрастная комби-

нация с двусторонней связью между компонентами (подбуры с признаками стратификации и НПО) (табл. 1). Но, как и в предыдущем случае, мощность перемещенного слоя мала для определения “стратифицированный”.

Еще один тип СПП формируется в местах заложения мелиоративных канав. Строительство сети открытых канав вдоль стенки карьера обусловлено необходимостью водоотвода поверхностных и талых вод, что предусмотрено технологией разработок полезных ископаемых. На дне канав выявлены абрауземы альфегумусовые, лишенные верхних горизонтов. Помимо этого, в понижениях на дне канавы диагностированы абрауземы альфегумусовые стратифицированные, которые формируются в результате привноса гумусированного материала с потоком воды. Таким образом, на дне канавы формируется двухкомпонентная неконтрастная СПП, наиболее близкая по генезису к вариациям.

Кавальеры канавы представлены стратифицированными подбурами, в профиле которых имеется как погребенный гумусовый горизонт, так и вновь формирующийся органогенный на поверхности. С поверхности кавальеров наблюдается перенос материала и растворов в канаву, формируется односторонняя связь между ареалами стратифицированного подбура и вариацией на дне канавы. В результате возникает контрастная регулярно-линейная СПП, которая по характеру связей наиболее близка к сложному сочетанию, однако по формам рельефа, компонентному составу ПП, форме почвенных ареалов и их характеристикам не имеет аналогов в естественном ПП (табл. 1).

#### *Почвенный покров ключевого участка на территории горнопромышленного комплекса “Толстое”*

Карьер “Толстое” – действующий карьер по добыче песчано-гравийного материала – расположен на востоке Ленинградской области в Подпорожском районе в 15 км на запад от города Подпорожья.

Характерной чертой этого горнодобывающего комплекса является территория внешних отвалов. Подобный ландшафт был описан В.А. Андрохановым при картографировании почвенного покрова техногенных ландшафтов Кузбасса (Андроханов, 2005).

Ключевой участок был заложен в северо-восточной части горнопромышленного комплекса. На исследованной территории выявлена система гребневидных или одиночных холмообразных вытянутых насыпей. Холмы имеют вытянутую форму, местами спускаются небольшими террасами вниз. Понижения имеют вторичную холмистость, создающую волнистую поверхность. Переход высот составляет до 7 м (рис. 5).



**Рис. 5.** Холмистая поверхность отвалов действующего карьера по добыче песка и ПГС.

**Fig. 5.** Hilly surface of the spoil dumps of the quarry for the extraction of sand and gravel.

На дне выработки и склонах отвалов под мохово-лишайниковым покровом формируются ташеты, компонентами которых являются различные подтипы псаммоземов – псаммозем, псаммозем гумусовый, и псаммозем оподзоленный (рис. 6). Установлено, что признаки оподзоливания в виде отмытых зерен встречаются только под сосной, что подтверждается и литературными данными (Abakumov, 2010). Почвенная комбинация на данном участке формируется исключительно под влиянием растительности, так как, несмотря на хорошо выраженный рельеф, отвалы имеют рыхлое сложение за счет песчано-гравийного матери-

ала, что обеспечивает практически провальную фильтрацию (табл. 1). Таким образом, на данном этапе формирования почвенной комбинации связи между компонентами ПП не выявлено.



**Рис. 6.** Почвенный покров ключевого участка карьера “Толстое”.  
Масштаб 1 : 100.

**Fig. 6.** Soil cover of the key site of the Tolstoy quarry. Scale 1 : 100.

### Почвенный покров торфоразработок

Обследование территории выработанных торфяников проходило на трех участках в Ленинградской области: пос. Селиваново (Волховский район); пос. Красава (Тихвинский район); дер. Городец (Лужский район). Исследуемые выработанные торфоразработки представлены участками с частично удаленной торфяной толщиной (фрезерные поля) и регулярной сетью мелиоративных каналов и дорог. В границах исследуемых участков сформирована сложная комбинация, состоящая из трех типов СПП.

На выработанных полях торфяников нами диагностированы торфяные почвы. Как и для естественных почв, для них характерен торфяной профиль различной мощности, но не менее 30 см. Торфяный горизонт является остаточным слоем торфа, а его мощность и характер связаны с первичной неоднородностью залежи (Инишева, 2022). Следовательно, здесь формируются слабоконтрастные комбинации торфяных почв, различающихся по мощно-

сти и степени увлажнения. Контуры таких комбинаций имеют прямоугольную форму, что связано с фрезерным способом добычи торфа.

В местах прокладки грунтовых дорог с подсыпкой минерального грунта выявлены линейные ареалы НПО, реже стратоземов, и ниже по искусственным линейным формам рельефа – стратифицированных, либо турбированных торфяных почв. Здесь формируются комбинации, по контрастности и характеру взаимосвязи между компонентами наиболее близкие к сочетаниям. Однако, как и на ранее рассмотренных участках, форма рельефа, геометрия ареалов и компонентный состав не имеют аналогов в естественном ПП.

Вдоль осушительных канав также формируются линейные комбинации стратифицированных и абрадированных торфяных почв разной степени увлажнения.

Таким образом, СПП территории торфоразработок формируется по типу сложной регулярно-ячеистой мозаики-сочетания. Компонентами этой комбинации являются регулярно линейные сочетания-мозаики вдоль дорог, вариации вдоль осушительных канав и пятнистости торфяных почв, образующиеся на остаточном торфе (табл. 1).

### **Почвенный покров карьера по добыче озерно-ледниковых глин**

Месторождение цементных глин “Большие поля” находится в 2 км севернее г. Сланцы. Добыча глины ведется с 2000-х годов в полезной толще (озерно-ледниковые ленточные глины). Естественный ПП до начала разработок был представлен вариацией подзолов разной степени гидроморфности. В результате антропогенной деятельности на территории горнопромышленного комплекса был практически полностью уничтожен ПП, растительность и кардинально изменился рельеф. Кроме этого, на месте выработки на дневной поверхности оказались глины, которые в естественном ландшафте были перекрыты песчаными озерными отложениями. Таким образом, были изменены все факторы почвообразования, за исключением климата.

ПП территории данного горнопромышленного комплекса

формируется в результате нескольких видов антропогенного воздействия, которое привело к появлению разных типов СПП.

В ходе полевого обследования было установлено, что в границах горнoprомышленного комплекса преобладают НПО, которые занимают 57% от общей площади. НПО представлены ячейками  $6 \times 45$  м, большинство из которых заполнено водой; отвалами породы по краям ячеек высотой от 1 до 2 м, выровненными площадками и подъездными дорогами (рис. 8).



**Рис. 8.** Общий вид ячеек на территории карьера по добычи глины.  
**Fig. 8.** General view of cells at the clay quarry site.

Подъездные дороги, проходящие по всей территории и ведущие к ячейкам, сложены обломками известняка (НПО), в редких случаях их можно диагностировать как стратифицированный образец альфегумусовый глеевый.

В местах, где ранее был полностью уничтожен ПП (подготовленное к добыче и заброшенное карьерное поле), выделена слабоконтрастная комбинация псаммоземов, араземов альфегумусовых и выходы песчаной породы (НПО). Генетическая связь между этими компонентами отсутствует, поэтому по генезису формирующаяся комбинация является ташетом. Эта комбинация распространена на 27% от общей площади участка.

По краю карьера с восточной стороны проходит расчищенная от растительности территория шириной 5–6 м и возвышающа-

ся над карьерным полем на 0.5 м. Поверхность закреплена редкой растительностью: кипрей узколистный, мать-и-мачеха, лисохвост короткоостый. Здесь формируется слабоконтрастная комбинация, компонентами которой являются подзолы абрadiрованные и подзолы стратифицированные.

Вдоль границы соснового леса с карьером проложена мелиоративная канава шириной 4 м и глубиной до 3 м. Вдоль канав расположены подзолы, склоны канавы представлены абрadiрованными подзолами, а дно – НПО – чередованием слоев песка и глины разной мощности. Такое строение обусловлено расположением участка на озерно-ледниковых отложениях и дополнительным привносом материала с вышележащей поверхности. В результате образуется контрастная почвенная комбинация по типу сочетания с преобладанием однонаправленной связи.

Все почвенные ареалы участка обладают геометрически правильной конфигурацией, которая определяется технологией добычи. Вытянутая форма характерна для линейных объектов: дороги, канавы и отвалы, прямоугольная – для ячеек, где осуществляется добыча глины.

В целом ПП всего горнопромышленного комплекса по добыче глины следует охарактеризовать как сложную мозаику.

## ВЫВОДЫ

Исследования показали, что разработка месторождений различных полезных ископаемых имеет общие тенденции в преобразовании ПП. В результате практически полного уничтожения ПП на части территории всех горнопромышленных комплексов выявлены крупные окружные или прямоугольной формы ареалы НПО или комбинации почв первичного ствола почвообразования. В местах прокладки подъездных грунтовых дорог и мелиоративных канав диагностируются линейные ареалы стратоземов, стратифицированных почв и НПО, которые образуют контрастные почвенные комбинации по типу сочетаний-мозаик. Прилегающая территория к карьерам и другим объектам горнопромышленных комплексов представлена естественными слабонарушенными почвами (измененный водный режим, “запыление” поверхности). При этом характер изменений ПП определяется конкретным типом добыва-

емого полезного ископаемого.

Установлено, что при разработке карьеров формируются как известные типы СПП, характерные для естественных территорий, так и совершенно новые, не имеющие аналогов в естественных ландшафтах.

Горнопромышленные предприятия на территории Ленинградской области активно развиваются и это приводит к кардинальной трансформации ПП на значительных площадях. Для создания почвенных карт крупных агропромышленных регионов и для оценки экологических функций ПП на нарушенных территориях необходимо дальнейшее исследование антропогенно-преобразованных и антропогенных СПП.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абакумов Е.В., Гагарина Э.И. Начальные стадии почвовосстановления на отвалах отсева дробления гранитов в районе горнодобывающего комплекса пос. Кузнецкое (Ленинградская область) // Вестник СПбГУ. 2003. Сер. 3. № 3(19). С. 87–95.
2. Андроханов В.А. Почвенно-экологическое состояние техногенных ландшафтов: динамика и оценка: Дис. ... доктора биологических наук: 03.00.27. Новосибирск, 2005. 379 с.
3. Андроханов В.А., Курачев В.М. Почвенно-экологическое состояние техногенных ландшафтов: динамика и оценка. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2010. 223 с.
4. Беляев Д.С., Чхетия С.Б., Мурашко И.И., Торопова Н.М. Состояние окружающей среды в Ленинградской области. СПб, 2022. 528 с.
5. Гагарина Э.И., Матинян Н.Н., Счастная Л.С., Касаткина Г.А. Почвы и почвенный покров Северо-Запада России. СПб.: Изд-во СПбГУ, 1995. 234 с.
6. Егоров В.В., Фридланд В.М., Иванова Е.Н. и др. Классификация и диагностика почв СССР. М.: Изд-во “Колос”, 1977. 221 с.
7. Инишева Л.И. Предложения к классификации торфяных почв // Почвоведение. 2022. № 2. С. 168–175.
8. Касаткина Г.А. Особенности почвообразования в условиях сельского ландшафта Карельского перешейка: автореферат Дис. ... канд. биол. н.: 06.01.03, 1993. 18 с.
9. Парамонова Т.А., Тишкina Э.В., Краснов С.Ф., Толстыхин Д.О. Структура почвенного покрова и основные свойства почв природного

- парка Воробьевы горы // Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение. 2010. № 1. С. 24–34.
10. Пахомов В.П. Комплексная социально-экономическая оценка минеральных ресурсов при производстве геологоразведочных работ в районах нового хозяйственного освоения на примере Уральского Севера: Автореф. дис. ... докт. экон. н. М., 1989. 13 с.
11. Пестряков В.К. Почвы Ленинградской области. Л.: Лениздат, 1973. 344 с.
12. Сухачева Е.Ю., Апарин Б.Ф. Структура почвенного покрова антропогенно-измененных ландшафтов Ленинградской области // Почвоведение. 2019. № 9. С. 1140–1154.
13. Сухачева Е.Ю., Апарин Б.Ф., Андреева Т.А., Казаков Э.Э., Лазарева М.А. Принципы и методы создания цифровой среднемасштабной почвенной карты Ленинградской области // Науки о Земле. 2019. № 64. С. 100–113.
14. Сухачева Е.Ю. Почвы и почвенный покров антропогенно-преобразованных территорий: Дис. ... докт. геогр. н.: 25.00.23. СПб, 2020. 563 с.
15. Сухачева Е.Ю. Учение о структуре почвенного покрова: новые вызовы и новые возможности // ПОЧВЫ – ОПОРА РОССИИ. Тезисы докладов IX съезда Общества почвоведов им. В.В. Докучаева. Москва–Казань: МАКС-Пресс, 2024. С. 387–389.
16. Фридланд В.М. Структура почвенного покрова. М., 1972. 423 с.
17. Хитров Н.Б., Лойко С.В. Структура почвенного покрова плоских водораздельных пространств Каменной степи // Почвоведение. 2010. № 12. С. 1411–1423.
18. Шишлов Л.Л., Тонконогов В.Д., Лебедева И.И., Герасимова М.И. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 235 с.
19. Abakumov E., Trubetskoy O., Demin D., Celi L., Cerli C., Trubetskaya O. Humic acid characteristics in podzol soil chronosequence // Chem. Ecology. 2010. No. 26. pp. 59–66. DOI: <https://doi.org/10.1080/02757540.2010.497758>.
20. Timofeeva Y.R., Suhacheva E.Y., Zakharova M.K. Soil cover of areas of mining sand and sand-gravel material in the Leningrad region // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 862 012064. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/862/1/012064>.

## REFERENCES

1. Abakumov E.V., Gagarina E.I. б Nachal'nye stadii pochvovosstanovleniya

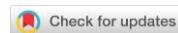
- na otvalakh otseva drobleniya granitov v raione gornodobyvayushchego kompleksa pos. Kuznechnoe (Leningradskaya oblast') (Initial stages of soil remediation on granite crushing waste dumps in the area of mining complex of Kuznechnoye settlement (Leningrad region)), *Vestnik SPbGU*, 2003, Ser. 3, No. 3 (19), pp. 87–95.
2. Androkhyanov V.A., *Pochvenno-ekologicheskoe sostoyanie tekhnogennykh landshaftov: dinamika i otsenka: Diss. ... dokt. biol. nauk* (Soil and ecological state of technogenic landscapes: dynamics and evaluation, Dr. Bio. Sci. thesis), Novosibirsk, 2005, 379 p.
3. Androhanov V.A., Kurachev V.M., *Pochvenno-jekologicheskoe sostojanie tehnogennych landshaftov: dinamika i ocenka* (Soil-ecological state of technogenic landscapes: dynamics and assessment), Novosibirsk: Izd-vo SO RAS, 2010, 223 p.
4. Belyaev D.S., Chkhetiya S.B., Murashko I.I., Toropova N.M., *Sostoyanie okruzhayushchei sredy v Leningradskoi oblasti* (State of the environment in the Leningrad Region), Saint-Petersburg, 2022, 528 p.
5. Gagarina E.I., Matinyan N.N., Schastnaya L.S., Kasatkina G.A., *Pochvy i pochvennyi pokrov Severo-Zapada Rossii* (Soils and soil cover of North-West Russia), Saint-Petersburg.: Izd-vo SPbGU, 1995, 234 p.
6. Egorov V.V., Fridland V.M., Ivanova E.N. et al., *Klassifikacija i diagnostika pochv SSSR* (Classification and diagnostics of soils of the USSR), Moscow: Kolos, 1977, 221 p.
7. Inisheva L.I., *Predlozheniya k klassifikatsii torfyanykh pochv* (Ideas for the classification of peat soils), *Pochvovedenie*, 2022, No. 2, pp. 168–175.
8. Kasatkina G.A., *Osobennosti pochvoobrazovaniya v uslovijah sel'govogo landshafta Karelskogo pereshejka: avtoref. diss. biol. nauk* (Peculiarities of soil formation in conditions of rural landscape of the Karelian Isthmus, Extended abstract of Cand. Biol. Sci. thesis), 1993, 18 p.
9. Paramonova T.A., Tishkina E.V., Krasnov S.F., Tolstikhin D.O., *Struktura pochvennogo pokrova i osnovnye svoistva pochv prirodnogo parka Vorob'evy gory* (Soil cover structure and main soil properties of the Vorobyovy Gory Nature Park), *Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 17. Pochvovedenie*, 2010, No.1, pp. 24–34.
10. Pakhomov V.P., *Kompleksnaya sotsial'no-ekonomiceskaya otsenka mineral'nykh resursov pri proizvodstve geologorazvedochnykh rabot v raionakh novogo khozyaistvennogo osvoeniya na primere Ural'skogo Severa: Avtoref. diss. ... dokt. ekonom. nauk* (Complex socio-economic assessment of mineral resources in the production of geological exploration in areas of new economic development in the example of the Ural North, Diss. Dr. Econ. Sci. thesis), Moscow, 1989, 13 p.
11. Pstryakov V.K., *Pochvy Leningradskoi oblasti* (Soils of the Leningrad

- region), Leningrad: Lenizdat, 1973, 344 p.
12. Suhacheva E.Yu., Aparin B.F., *Struktura pochvennogo pokrova antropogenno-izmenennyh landshaftov Leningradskoj oblasti* (Soil cover patterns in anthropogenically transformed landscapes of Leningrad oblast), *Pochvovedenie*, 2019, No. 9, pp. 1140–1154.
13. Suhacheva E.Yu., Aparin B.F., Andreeva T.A., Kazakov E.E., Lazareva M.A., *Printsipy i metody sozdaniya tsifrovoi srednemasshtabnoi pochvennoi karty Leningradskoi oblasti* (Principle i metody sozdanija cifrovoj srednemasshtabnoj pochvennoj karty Leningradskoj oblasti), *Nauki o Zemle*, 2019, No. 64, pp. 100–113.
14. Suhacheva E.Yu., *Pochvy i pochvennyj pokrov antropogenno-preobrazovannyh territorij: diss. ... dokt. geogr. n.* (Soils and soil cover of the anthropogenically transformed areas, Dr. Geogr. Sci. thesis, 25.00.23), St. Petersburg, 2020, 563 p.
15. Suhacheva E.Yu., Uchenie o strukture pochvennogo pokrova: novye vyzovy i novye vozmozhnosti (Teaching about the structure of the soil cover: new challenges and new opportunities), *Pochvy – Opora Rossii*, Proc. IX Congress of the Society of Soil Scientists named after V.V. Dokuchaev, Moscow-Kazan: MAKS-Press, 2024, pp. 387–389.
16. Fridland V.M., *Struktura pochvennogo pokrova* (Structure of the soil cover), Moscow, 1972, 423 p.
17. Khitrov N.B., Loiko S.V., Struktura pochvennogo pokrova ploskikh vodorazdel'nykh prostranstv Kamennoi stepi (Soil cover structure of flat watershed spaces of the Kamennaya Steppe), *Pochvovedenie*, 2010, No. 12, pp. 1411–1423.
18. Shishov L.L., Tonkonogov V.D., Lebedeva I.I., Gerasimova M.I., *Klassifikatsiya i diagnostika pochv Rossii* (Classification and diagnostics of soils in Russia), Smolensk: Oikumena, 2004, 235 p.
19. Abakumov E., Trubetskoy O., Demin D., Celi L., Cerli C., Trubetskaya O., Humic acid characteristics in podzol soil chronosequence, *Chem. Ecology*, 2010, No. 26, pp. 59–66, DOI: <https://doi.org/10.1080/02757540.2010.497758>.
20. Timofeeva Y.R., Suhacheva E.Y., Zakharova M.K., Soil cover of areas of mining sand and sand-gravel material in the Leningrad region, *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 862 012064, DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/862/1/012064>.

УДК 631.48



DOI: 10.19047/0136-1694-2025-126-117-136



**Ссылки для цитирования:**

Устимук Г.М., Лозбенев Н.И. Ландшафтно-позиционная обусловленность вывода из сельскохозяйственного оборота земель Нечерноземья на примере Калининского муниципального округа Тверской области // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2025. Вып. 126. С. 117-136. DOI: 10.19047/0136-1694-2025-126-117-136

**Cite this article as:**

Ustimuk G.M., Lozbenev N.I., Landscape and positional substantiation of the withdrawal of fallow lands from agricultural use in Nonchernozem zone by the example of Kalininsky municipal district of Tver region, Dokuchaev Soil Bulletin, 2025, V. 126, pp. 117-136, DOI: 10.19047/0136-1694-2025-126-117-136

**Благодарность:**

Работа выполнена в рамках Государственного Задания Министерство науки и высшего образования РФ на тему: “Оптимизация сельскохозяйственного землепользования по экологическим и экономическим условиям в контексте современных вызовов” (№ FGUR-2025-0008).

**Acknowledgments:**

The work was carried out as part of the State Assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation on the topic: “Optimization of agricultural land use under environmental and economic conditions in the context of modern challenges” (No. FGUR-2025-0008).

**Ландшафтно-позиционная обусловленность  
вывода из сельскохозяйственного оборота земель  
Нечерноземья на примере Калининского  
муниципального округа Тверской области**

© 2025 г. Г. М. Устимук<sup>1\*</sup>, Н. И. Лозбенев<sup>2\*\*</sup>

<sup>1</sup>МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия,  
119991, Москва, Ленинские горы, 1,

\*<https://orcid.org/0009-0002-4420-7241>,  
e-mail: [ustimuk.gennady@gmail.com](mailto:ustimuk.gennady@gmail.com).

<sup>2</sup>ФИЦ “Почвенный институт им. В.В. Докучаева”, Россия,  
119017, Москва, Пыжевский пер, 7, стр. 2,  
\*\*<https://orcid.org/0000-0003-0377-3124>, e-mail: [nlozbenev@mail.ru](mailto:nlozbenev@mail.ru).

Поступила в редакцию 29.11.2024, после доработки 11.07.2025,  
принята к публикации 13.11.2025

**Резюме:** Сельское хозяйство Тверской области, и Калининского муниципального округа в частности, сильно пострадало от вывода земель из сельскохозяйственного оборота и депопуляции. Посевная площадь с конца 1960-х до 2023 гг. уменьшилась в 8 раз. В связи с этим Правительством Российской Федерации была принята “Государственная программа эффективного вовлечения в оборот земель сельскохозяйственного назначения…”, в рамках которой необходимо оценить площади и качество залежных земель. В данной работе проведена оценка качества земель сельскохозяйственного назначения Калининского округа на основе крупномасштабных материалов землеустройства советского периода с использованием методов цифровой почвенной картографии. Составленная карта агроэкологических групп земель позволила дать оценку качества земель и определить целесообразность их использования в растениеводстве. Определено, что слабополугидроморфно-литогенная, литогенная и плакорная группы земель имеют самую высокую агроэкологическую ценность. Общая площадь залежи в пределах этих групп составляет 33.5 тыс. га, или чуть более 15% от общей площади земель сельскохозяйственного назначения Калининского округа. Ввод в оборот гидроморфных земель здесь нецелесообразен. Для оценки роли ландшафтного и позиционного факторов в процессе вывода земель из сельскохозяйственного оборота проведена инвентаризация площадей и состояния земель сельскохозяйственного назначения, рассчитана удаленность от важных инфраструктурных и природных объектов. Выявлено, что наиболее сильно на вывод земель из сельскохозяйственного оборота повлияла удаленность от дорог с твердым покрытием, а ландшафтный фактор занял второе место, причем он в 2.5 раза менее значим согласно F-критерию дискриминантной модели. Остальные позиционные факторы (расстояния до болот и водотоков) оказались второстепенны.

**Ключевые слова:** цифровое почвенное картографирование; агроэкологическая оценка земель; залежь; землепользование.

# Landscape and positional substantiation of the withdrawal of fallow lands from agricultural use in Nonchernozem zone by the example of Kalininsky municipal district of Tver region

© 2025 G. M. Ustimuk<sup>1\*</sup>, N. I. Lozbenev<sup>2\*\*</sup>

<sup>1</sup>*Lomonosov Moscow State University,  
1 Leninskie Gori, Moscow 119991, Russian Federation,*  
<sup>\*</sup><https://orcid.org/0009-0002-4420-7241>,  
*e-mail: [ustimuk.gennady@gmail.com](mailto:ustimuk.gennady@gmail.com).*

<sup>2</sup>*Federal Research Centre “V.V. Dokuchaev Soil Science Institute”,  
7 Bld. 2 Pyzhevskiy per., Moscow 119017, Russian Federation,  
\*\*<https://orcid.org/0000-0003-0377-3124>, e-mail: [nlozbenev@mail.ru](mailto:nlozbenev@mail.ru).*

Received 29.11.2024, Revised 11.07.2025, Accepted 13.11.2025

**Abstract:** Agriculture in the Tver Region, and the Kalininsky Municipal District, in particular, have suffered greatly from the withdrawal of lands from agriculture use and depopulation. The sown area has decreased by 8 times from the late 1960s to 2023. In this regard, the Government of the Russian Federation adopted the “State Program for the Effective Involvement of Agricultural Lands in Circulation...”, within the framework of which it is necessary to assess the area and quality of fallow lands. This paper assesses the quality of agricultural land in the Kalinin District based on both large-scale land management materials from the Soviet period and using digital soil mapping methods. The compiled map of agroecological land groups made it possible to assess the quality of the municipal district lands and determine the feasibility of crop growing on them. It was determined that the weakly semihydromorphic-lithogenic, lithogenic land and upland groups have the highest agroecological value. The total area of deposits within these groups is 33.5 thousand ha or slightly more than 15% of the total area of agricultural land in the Kalininsky District. Putting hydromorphic lands into agricultural use in the Region is not advisable. To assess the role of landscape and positional factors in land abandonment, an inventory of the areas and condition of agricultural lands was conducted, and the distances from important infrastructure and natural objects were calculated. It was found that the greatest impact on the withdrawal of follow lands from agriculture use was the distance from hard-surface roads, and the landscape factor took the second place, and it is almost 3 times less significant according to the F-criterion of

discriminant model. The remaining positional factors (distances from wetlands and watercourses) turned out to be secondary.

**Keywords:** digital soil mapping; agroecological land assessment; fallow lands; land use.

## ВВЕДЕНИЕ

Уже несколько десятилетий для Российской Федерации актуальна проблема вывода земель из сельскохозяйственного оборота. Тренд на сокращение обрабатываемых земель начался еще в начале XX в. перед революцией, усилился в советские годы, а при переходе к рыночной экономике приобрел и вовсе пугающие масштабы (Милов, 2006; Люри и др., 2010; Матасов, 2018; Prishcherov, 2013). Согласно постановлению Правительства Российской Федерации от 14 мая 2021 г. № 731 (далее ПП РФ № 731 от 2021) за период с 2010 по 2020 гг. площадь земель сельскохозяйственного назначения сократилась на 17.6 млн га (на 4.6%), также по состоянию на 2021 г. на территории земель сельскохозяйственного назначения 19.4 млн га пашни (5.1%) не используются. При этом с 1997 г. качественная оценка продуктивных сельскохозяйственных земель не проводится. В связи с этим с целью исполнения ПП РФ № 731 от 2021 была запущена “Государственная программа эффективного вовлечения в оборот земель сельскохозяйственного назначения…”, где одной из важных задач является “проведение оценки состояния плодородия неиспользуемой пашни…”.

На настоящий момент в науке уже имеется накопленный опыт в оценке качества земель и организации рационального землепользования с ландшафтной точки зрения (Николаев и др., 2008; Кирюшин, 2023). В течение длительного времени развивались описание и анализ морфологической структуры ландшафта для задач региональной оптимизации землепользования (Зворыкин, 1965, 1981; Николаев, 1987, 2000; Кирюшин, 2005). Также совершенствовались методы графической интерпретации морфологической структуры ландшафта, пройдя путь от качественного описания природной среды (Анненская и др., 1963; Мамай, 2005) до цифрового картографирования (Козлов, 2009; McBratney et al., 2003; Hengl, MacMillan, 2019). Одна из задач современного ланд-

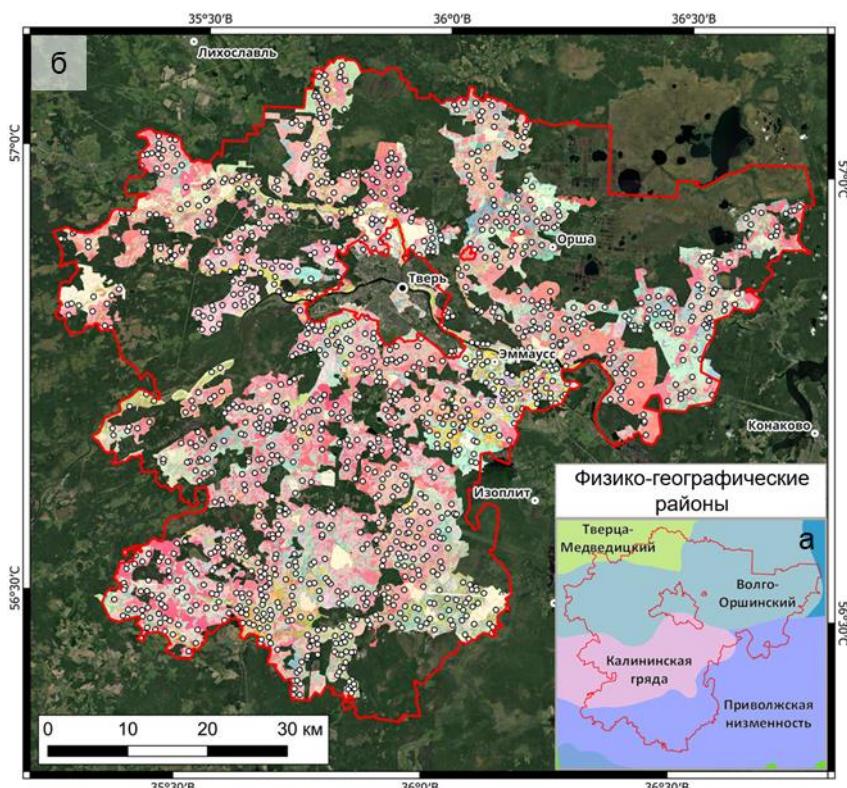
шафтования – объяснить трансформацию структуры землепользования ландшафтно-экологическими и социально-экономическими причинами для принятия локальных и региональных управлений решений (Матасов, 2018).

Цель работы состояла в выявлении ландшафтно-позиционных причин вывода земель из сельскохозяйственного оборота Калининского муниципального округа Тверской области на основе привязанных крупномасштабных почвенных карт, ДДЗ и технологий цифрового картографирования.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Калининский муниципальный округ Тверской области занимает площадь 4 244.7 км<sup>2</sup>. Климат умеренный со средними температурами в январе и июле  $-9^{\circ}\text{C}$  и  $+18^{\circ}\text{C}$  соответственно, и годовой суммой осадков 670 мм с варьированием от 500 до 1 000 мм. Вегетационный период длится 170–175 дней, а безморозный – примерно 130 дней (Дорофеев, 1992). Реки, в том числе р. Волга, характеризуются слабым развитием долин, но при этом амплитуда колебания высот в пределах исследуемой территории достигает 148 м. Среди водоемов сильно выделяются Петровские озера с общей площадью 82 км<sup>2</sup> в пределах болотного массива Оршинский мох. Сам же болотный массив имеет площадь 432 км<sup>2</sup> включая озера (1/10 исследуемой территории).

В физико-географическом отношении территория Калининского муниципального округа неоднородна – выделяются 4 района (Гвоздецкий и др., 1963; рис. 1а). Почти половину исследуемой территории (47.8%) занимает Волго-Оршинский район, для которого характерна большая заболоченность и пестрота почвенного покрова из-за частой смены почвообразующих пород. Рельеф выровненный с абсолютными высотами междуречий 150 м. В восточной части расположены крупные болотные массивы, а в западной преобладают дерново-среднеподзолистые супесчаные почвы, приуроченные к аллювиально-зандровой равнине. Для плоских и пониженных частей водоразделов характерны торфяно-подзолисто-глеевые почвы. Второе место по площади занимает физико-географический район Калининской гряды (26.4%). Рельеф холмистый ледникового происхождения.



**Рис. 1.** Положение относительно единиц физико-географического районирования (а) и инвентаризация агротехнологических условий Калининского муниципального округа по данным ГФДЗ (б).

**Fig. 1.** Study area location above units of physical-geographical zoning (а) and inventory of agro-ecological conditions of the Kalininsky municipal district according to the State Fund for Agricultural Development (б).

Здесь находится самая высокая точка – 257 м. Среди почвообразующих пород преобладают моренные суглинки, но встречаются и супеси. На вершинах холмов распространены дерново-слабо- и среднеподзолистые почвы, на равнинах – средне- и сильноподзолистые. Плоские участки заболочены. Район Приволжской низменности (18.8%) представляет собой плоскую зануренную

аллювиальную слабодренированную равнину с высотами 120–125 м. Преобладающие почвы – дерново-среднеподзолистые супесчаные, формирующиеся на песках мощностью более 1.5 м. Широко представлены болотные почвы. Тверца-Медведицкий район занимает незначительную площадь (5.7%) с высотами 150–200 м. В пределах Калининского муниципального округа его облик схож с Волго-Оршинским районом.

На сегодняшний день население округа превышает 50 тыс. человек, однако сильно выражен отрицательный тренд: с 1950-х годов население снизилось на 20 тыс. человек. В послевоенные годы Калининский район был одним из крупнейших сельхозтоваропроизводителей Тверской области, однако к 2016 г. с конца 1960-х площадь сельскохозяйственных угодий в Тверской области сократилась более чем на 2 млн га. Также отрицательная тенденция отражается в сокращении посевной площади.

Для характеристики природных условий муниципального округа были использованы материалы Государственного фонда данных, полученных в результате землеустройства (ГФДЗ): крупномасштабные (1 : 10 000) планы внутrixозяйственного землеустройства и почвенные карты колхозов и совхозов 1970-х годов (36 хозяйств, рис. 1б). К каждой почвенной карте имеются очерки, подробно описывающие геоморфологические, геологические, геоботанические и почвенные условия предприятия с присвоенной агрономической оценкой. Привязка почвенных карт проводилась в программном обеспечении “Global Mapper” методом триангуляции с максимальной ошибкой в 30 м, используя 150–250 опорных точек на привязанных планах внутrixозяйственного землеустройства.

На почвенных картах отмечены положения опорных разрезов, имеющих подробное морфологическое и агрохимическое описание. На основе этих данных в ГИС был создан точечный векторный слой, в атрибутивной таблице которого содержалась информация о типе почвы, степени оглеения, гранулометрическом составе почв и почвообразующих пород, а также о глубине залегания морены. Суммарно нанесены местоположения 1 294 точек (рис. 1б). Каждая точка отнесена к одной из 10 агроэкологических групп земель (табл. 1). Под агроэкологическими группами земель

понимается территория, выделяемая по ведущим агроэкологическим факторам, которые определяют направление сельскохозяйственного использования, а также по степени их проявления и сопутствующим лимитирующими факторам (Кирюшин и др., 2005).

**Таблица 1.** Общая выборка описаний опорных разрезов, отнесенных к различным агроэкологическим группам земель

**Table 1.** General sample of soil descriptions in reference to various agroecological groups of land

1. Пла-корные	2. Слабо-эрзацион-ные	3. Слабополу-гидроморфные	4. Сильно-полугидро-морфные	5. Слабо-гидро-морфные
140	17	374	118	48
6. Гидро-морфные	7. Литогенные	8. Слабо-полугидро-морфно-литогенные	9. Сильно-полугидро-морфно-литогенные	10. Пойменные
61	169	162	56	149

Почвы плакорной агроэкологической группы земель (№ 1 в табл. 1) представлены дерново-подзолистыми суглинистыми почвами, а также дерново-подзолистыми супесчаными, но с залеганием морены до 50 см от поверхности, которые приурочены к дренированным равнинам, сложенным моренными и покровными суглинками со склонами крутизной до 2°. Данная агроэкологическая группа считается наиболее ценной, так как не подвержена застою влаги. Почвы слабоэрзационной агроэкологической группы (2) приурочены к моренным равнинам, где крутизна склонов превышает 2°. Представлены слабосмытыми суглинистыми и супесчаными почвами, подстилаемыми мореной до 50 см. Менее плодородны из-за проявлений эрозионных процессов и оттока влаги, критичного в летний период.

Полугидроморфные агроэкологические группы (3–4) отличаются от вышеперечисленных более частыми и длительными пе-

риодами переувлажнения, что отразилось на морфологическом строении почв. Для слабополугидроморфной агроэкологической группы земель (3) характерны дерново-подзолистые поверхностно-глеевые, либо грунтово-глеевые, для сильнополугидроморфных (4) – профильно-глеевые и глеевые. К слабогидроморфным землям (5) отнесены варианты дерново-глеевых и дерново-перегнойно-торфянисто-подзолистых почв, а к гидроморфным (6) – земли с торфянисто- и перегнойно-глеевыми почвами.

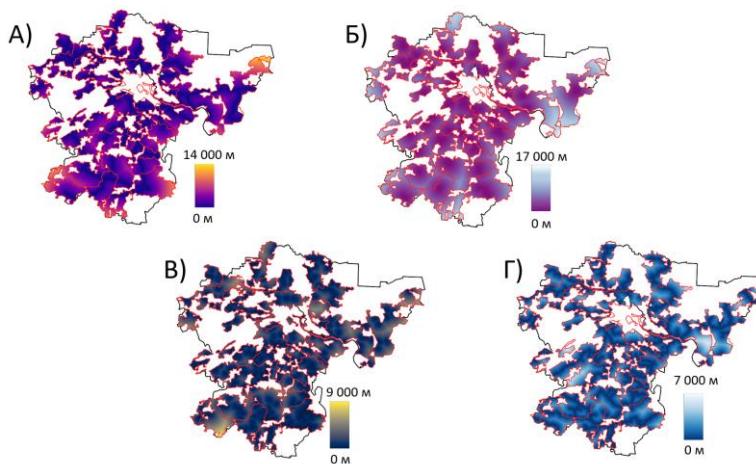
Особое место занимает ряд литогенных агроэкологических групп (7–9). Они приурочены к водно-ледниковым равнинам и от других групп отличаются большей мощностью песчаных отложений и более глубоким залеганием морены (глубже 50 см). Песчаные почвы считаются менее плодородными в связи с меньшим содержанием физической глины и питательных веществ. Однако слабоглеевые почвы, особенно в сухие годы, дают больший урожай, чем неоглеенные (Кирюшин, 2005). Поэтому слабополугидроморфно-литогенные агроэкологические группы земель с дерново-подзолами глееватыми (8) более благоприятны для растениеводства, чем литогенные (7) с дерново-подзолами. Сильнополугидроморфно-литогенные агроэкологические группы земель (9) характеризуются преобладанием дерново-подзолов профильно-глеевых и глеевых. Отдельно выделяется пойменная агроэкологическая группа (10) в пределах речных долин с аллювиальными почвами.

Для составления карты агроэкологических групп земель на основе базы данных опорных разрезов муниципального округа использована методология цифровой почвенной картографии (Козлов, Сорокина, 2012; Minasny, McBratney, 2018). Моделирование выполнено методом случайного леса (Random Forest) в среде “R” (версия 4.4.1) с надстройкой “Rstudio” (версия: 2024.09.1) с использованием пакета “Caret” (версия 6.0–4.4.9). В качестве независимых переменных использованы вегетационные индексы, рассчитанные по данным космической съемки и производные морфометрические величины рельефа. Последние рассчитаны на основе цифровой модели местности Copernicus DEM с разрешением 30 м в программе “SAGA GIS”. Всего использовано 15 геоморфометрических величин, в том числе: TWI (топографический индекс

влажности), LS-фактор (эрэзионный фактор рельефа), CNBL (базовый уровень сети водотоков), CND (расстояние до сети водотоков), Valley Depth (глубина долины), RSP (относительное положение на склоне), TPI (индекс топографического положения в локальной и региональной окрестностях), TRI (индекс расчлененности рельефа). В качестве индикационных характеристик использованы расчетные характеристики NDVI и NDWI за 2021–2023 гг. в разные сезоны года по данным съемочной системы Sentinel-2. Всего было использовано 8 сцен за следующие даты: 10.12.2021, 17.04.2022, 08.06.2022, 25.08.2022, 07.01.2023, 29.05.2023, 13.06.2023, 10.08.2023. Кроме того, в “Google Earth Engine” рассчитаны средние летние и среднемноголетние значения NDVI по безоблачным снимкам “Landsat 5–8” (1986–2023 гг.) и “Sentinel-2” (2018–2023 гг.).

Для земель сельскохозяйственного назначения проводилась инвентаризация современного состояния угодий методом визуального дешифрирования космических снимков сверхвысокого разрешения с сервисов “Google”, “Yandex”, “Bing”, “Esri”. В ходе визуального дешифрирования определялись угодья обрабатываемых, залежных земель и болотных массивов. Для оценки позиционного фактора на современное состояние угодий были взяты данные с картографического сервиса “OpenStreetMap”: асфальтированные дороги, населенные пункты с населением более 1 000 человек, постоянные и временные водотоки, заболоченные земли. На их основе были рассчитаны расстояния до болотных массивов, речной сети, населенных пунктов с населением больше 1000 человек и автомобильных дорог с твердым покрытием в растровом формате (рис. 2).

Оценка вклада позиционного и природного факторов, определяющих вывод земель из сельскохозяйственного оборота, проведена методом линейного дискриминантного анализа в программе “STATISTICA”, где в качестве зависимой переменной выступили виды угодий, а независимой – агрэкологические группы земель и позиционные факторы.



**Рис. 2.** Расстояния до А) дорог с твердым покрытием, Б) населенных пунктов с населением от 1 000 человек, В) заболоченных земель, Г) речных водотоков.

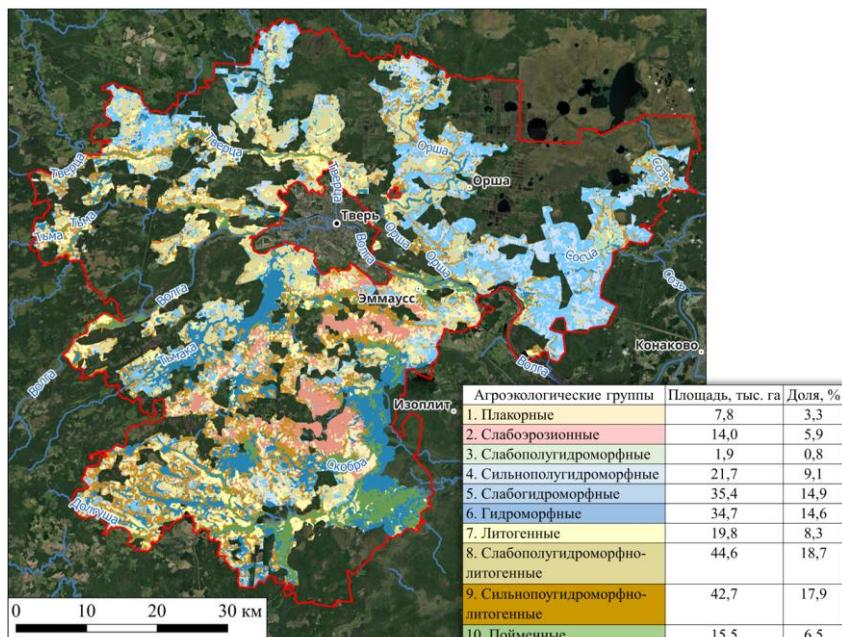
**Fig. 2.** Distances to А) paved roads, Б) settlements with a population more, than 1,000 people, В) wetlands, Г) river streams.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Точность предсказания доминантных агроэкологических групп земель в модели RandomForest составила 44%. Результат картирования приведен на рисунке 3. Наиболее значимыми в модели оказались 3 геоморфометрические переменные: абсолютная высота, превышение над базисом эрозии и глубина долин. Они определяют положение агроэкологических групп земель возрастающего гидроморфизма в факторном пространстве. Наименее значимые – мультиспектральные индексы по единичным снимкам и TPI с локальными окрестностями, что означает низкое влияние структуры малых мезоформ рельефа и локальных фитоценозов на иерархически более высокую ландшафтную структуру.

Расчет площадей агроэкологических групп в пределах округа показал (рис. 3), что наиболее распространены слабополугидроморфно- и сильно полугидроморфно-литогенные (19% и 18%).

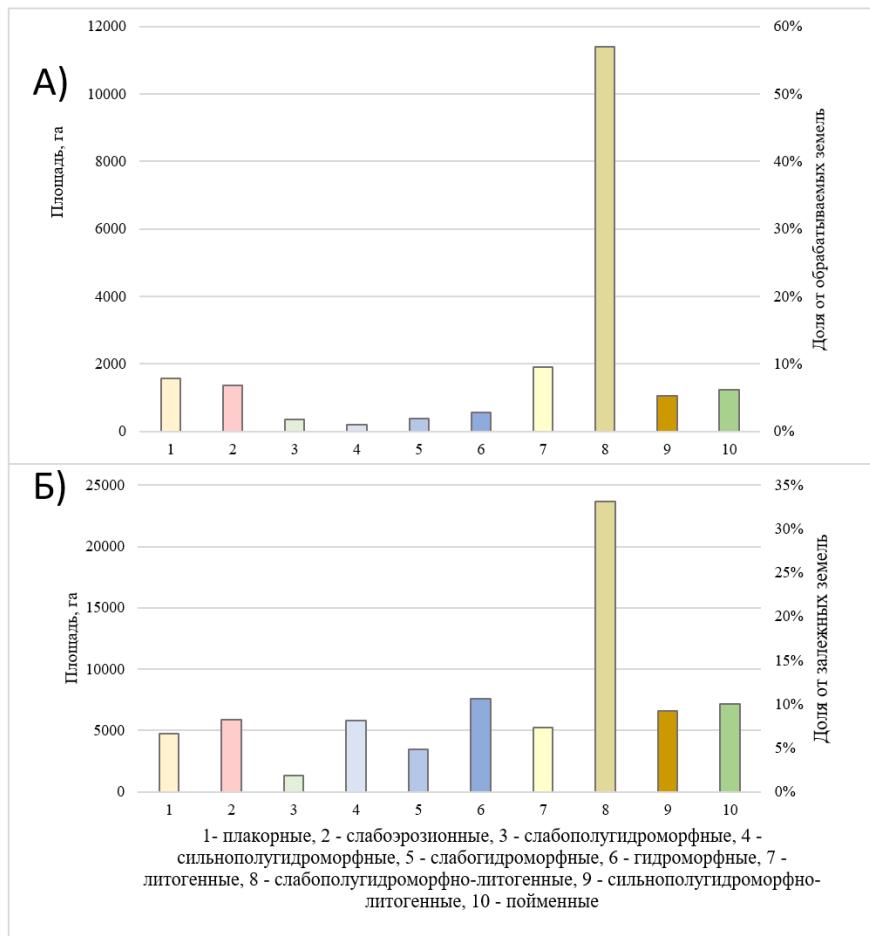
Вместе полугидроморфные и гидроморфные агроэкологические группы занимают около 39%. Все вышеперечисленные агроэкологические группы земель (76%) пригодны для возделывания сельскохозяйственных культур только после проведения гидромелиоративных мероприятий.



**Рис. 3.** Агроэкологические группы земель сельскохозяйственного назначения Калининского муниципального округа Тверской области.  
**Fig. 3.** Agroecological groups of agricultural lands of the Kalininsky municipal district of the Tver region.

Рассматривая отдельно площади групп земель в пределах пашен (рис. 4А) и залежей (рис. 4Б) отмечаем, что наиболее распаханная группа – слабополугидроморфно-литогенная (57% площади пашен). Остальные же не занимают и 10% пашен, а полу-гидроморфные и гидроморфные не достигают 4%. В залежах тоже превалируют слабополугидроморфно-литогенные земли, однако

не так уж сильно (33%), так как здесь другие агроэкологические группы представлены лучше, чем в пашнях.

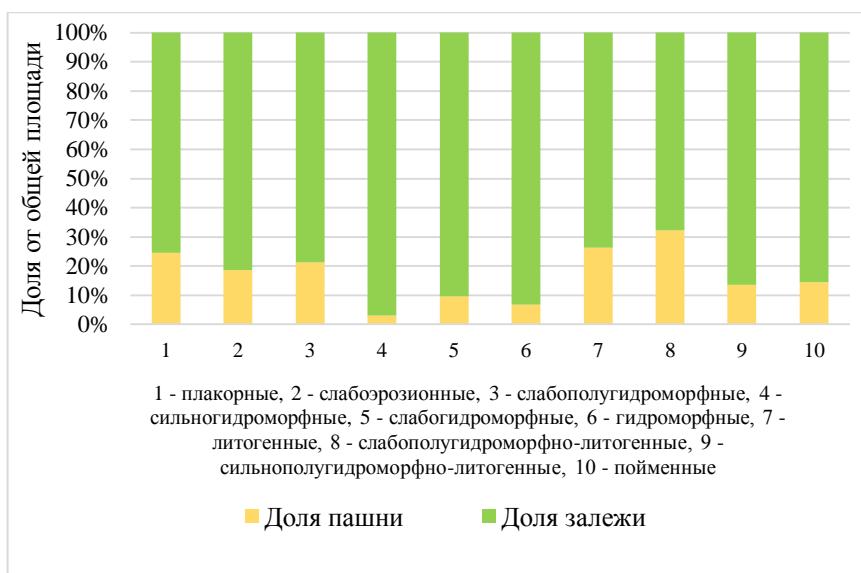


**Рис. 4.** Площади агроэкологических групп земель в пределах А) пашен и Б) залежей.

**Fig. 4.** The areas of agroecological land groups within А) arable land and Б) fallow land.

Важно отметить, что в залежах доли полугидроморфных и особенно гидроморфных земель сильно увеличились. Плакорные и слабоэрзационные (наиболее плодородные) земли в сумме достигают 9 тыс. га, что в 3.5 раза больше, чем на землях пашни.

Рассматривая соотношение пашни и залежи в пределах агроэкологических групп земель (рис. 5), обращаем внимание, что наименьшая степень распаханности характерна для трех наиболее переувлажненных агроэкологических групп: сильнополугидроморфной и обеих гидроморфных. Это объясняется тем, что переувлажнение в условиях Нечерноземья является крайне лимитирующим фактором для основных культур. Также неблагоприятными землями оказались сильнополугидроморфно-литогенные и пойменные агроэкологические группы, для которых тоже характерно сильное переувлажнение.



**Рис. 5.** Доли пашни и залежи в пределах каждой агроэкологической группы.

**Fig. 5.** Shares of arable land and fallow land within each agro-ecological group.

Соотношение пашни и залежи в пределах групп земель в условиях рыночной экономики рассматривается нами как индикатор пригодности земель для ведения сельского хозяйства. Самое благоприятное соотношение характерно для слабополугидроморфно-литогенной, литогенной и плакорной групп земель. Общая площадь залежей в пределах этих групп составляет 33.5 тыс. га или чуть более 15% от общей площади земель сельскохозяйственного назначения Калининского округа.

Проведенный для оценки вкладов позиционного и природного факторов дискриминантный анализ показал, что на распределение пашен и залежей в Калининском муниципальном округе наиболее сильно повлияла близость к автомобильным дорогам с твердым покрытием (табл. 2). Примерно в 2.5 раза слабее повлияли природные особенности территории (агроэкологические группы земель). Средний вклад в распределение пашен и залежей внесла близость до населенных пунктов с численностью населения от 1 000 человек, в 4.5 раза меньше – расстояния до дорог и в 1.7 раза меньше – природных особенностей территории. Менее всего повлияло расстояние до болот. Расстояние до водотоков не повлияло на распределение обрабатываемых и залежных земель в пределах района. Общая точность приведенной модели составила 62.7%.

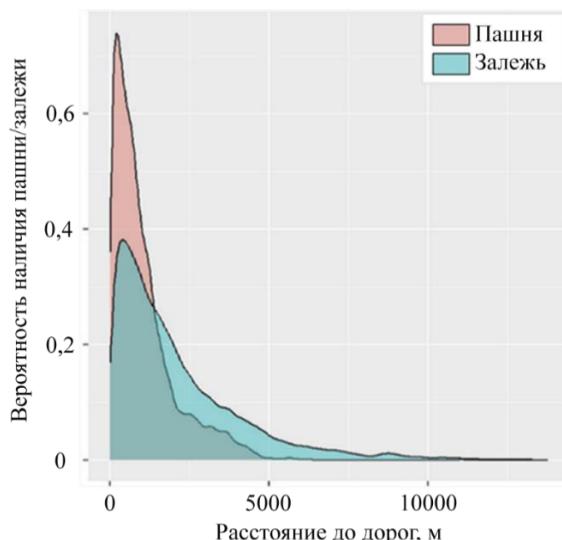
**Таблица 2.** Индикационная таблица дискриминантного анализа при определении вкладов природного и позиционного факторов в разделении пашни и залежи

**Table 2.** Indicative table of discriminant analysis in determining the contributions of natural and positional factors in the division of arable land and fallow land

Переменные	F-критерий	p-value
Расстояние до дорог	13 883.91	0.000000
Агроэкологические группы земель	5 316	0.000000
Расстояние до населенных пунктов	3 069	0.000000
Расстояние до болот	119.35	0.000000
Расстояние до водотоков	3.54	0.059952

Таким образом, на распространение залежей и пашен оказали влияние как природные, так и позиционные факторы. Причем влияние природно-позиционных факторов (удаленность от болот и от речных водотоков) незначительно в отличие от инфраструктурно-позиционных (удаленность от дорог и населенных пунктов). Наиболее значимым фактором оказались автомобильные дороги с твердым покрытием, а агроэкологические условия имели значительно меньшее значение.

Анализ функций плотности распределения показывает (рис. 7), что на расстоянии более 5 км от дорог с твердым покрытием сельскохозяйственные земли не распаиваются или, говоря другими словами, все пашни в Калининском муниципальном округе сосредоточены в пределах пятикилометровой доступности от автомобильных дорог. А основная часть обрабатываемых земель сосредоточена в пределах 2,5 км от дорог.



**Рис. 6.** Функции плотности распределения пашен и залежей относительно расстояний до дорог.

**Fig. 6.** Density plots of arable and fallow lands relative to distances from roads.

## ВЫВОДЫ

Проведенное исследование показало, что крупномасштабные материалы внутрихозяйственного землеустройства имеют высокую ценность для почвенного и ландшафтного картографирования, анализа агроэкологических условий и оценки пригодности земель к возврату в сельскохозяйственный оборот. На основе спряженного анализа архивных и дистанционных материалов составлена карта агроэкологических групп земель и определены наиболее благоприятные земли. По нашим оценкам порядка 33.5 тыс. га или чуть более 15% от площади сельскохозяйственных земель имеют высокий для данного региона потенциал.

Показано, что на вывод земель из сельскохозяйственного оборота наиболее сильно повлияла удаленность от дорог с твердым покрытием, а ландшафтный фактор повлиял в меньшей степени. Остальные позиционные факторы, кроме близости к населенным пунктам, оказались незначимыми.

Проведенная агроэкологическая группировка и оценка земель на базе архивных и дистанционных материалов с применением методологии цифровой почвенной картографии показала свою высокую ценность для конкретных прикладных задач в условиях центрального Нечерноземья. Однако она нуждается в расширении и верификации обучающей и обучаемой выборок, применении методологии структуры почвенного покрова и включении литологического строения почвообразующих пород в качестве переменных для повышения точности моделей почвенно-ландшафтных связей.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

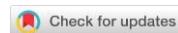
1. Анненская Г.Н. и др. Морфологическое изучение географических ландшаftов // Ландшафтovedение. М.: Изд-во АН СССР. 1963. С. 5–28.
2. Гвоздецкий Н.А. и др. Физико-географическое районирование Нечерноземного центра. М.: Изд. Моск. Унив., 1963. С. 192–200.
3. Дорофеев А.А. и др. География Тверской области. 1992. С. 31–55.
4. Зворыкин К.В. Сельскохозяйственная типология земель для кадастровых целей // Вопросы географии. 1965. С. 61–82.

5. История России XX – до начала XXI века: учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по специальности 030401 “История” / Милов Л.В. и др. М.: Эксмо, 2006. 958 с.
6. Кирюшин В.И. и др. Агроэкологическая оценка земель, проектирование адаптивно-ландшафтных систем земледелия и агротехнологий. М.: ФГНУ “Росинформагротех”, 2005. 784 с.
7. Козлов Д.Н. Цифровой ландшафтный анализ при крупномасштабном картографировании структур почвенного покрова. М.: МГУ, 2009. 26 с.
8. Козлов Д.Н., Сорокина Н.П. Традиции и инновации в крупномасштабной почвенной картографии // Цифровая почвенная картография: теоретические и экспериментальные исследования. М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 2012. С. 35–37.
9. Люри Д.И. и др. Динамика сельскохозяйственных земель России в ХХ в. и постагротенное восстановление растительности и почв. 2010.
10. Мамай И.И. Физическая география: структура, объекты и принципы исследований // Известия РГО. 2005. Вып. 3. С. 28–36.
11. Матасов В.М. Изменение структуры землепользования в ландшафтах Рязанской Мещеры с конца XVIII в.: Дис. ... к. г. н. М.: МГУ, 2018. 219 с.
12. Николаев В.А. Культурный ландшафт – геоэкологическая система // Вестник МГУ. Сер. 5. 2000. Т. 5. С. 3–8.
13. Николаев В.А., Копыл И.В., Сысюев В.В. Природно-антропогенные ландшафты (сельскохозяйственные и лесохозяйственные). М.: Географический факт. МГУ, 2008. 158 с.
14. Николаев В.А. Концепция агроландшафта // Вестн. МГУ. Сер. 5. География. 1987. № 2. С. 22–27.
15. Сельхоз Портал. URL: [https://сельхозпортал.рф/analiz-posevnyh-ploshhadej/?region\\_id=2266&region\\_child\\_id=4585&area=1](https://сельхозпортал.рф/analiz-posevnyh-ploshhadej/?region_id=2266&region_child_id=4585&area=1).
16. Hengl T., MacMillan R.A. Predictive soil mapping with R // OpenGeoHub Foundation. Wageningen, 2019. P. 227–273.
17. McBratney A.B., Santos M.L.M., Minasny B. On digital soil mapping // Geoderma. 2003. Т. 117. № 1–2. С. 3–52.
18. Minasny B., McBratney A.B. Digital soil mapping: A brief history and some lessons // Geoderma. 2016. Vol. 264. Part B–C. P. 301–311. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.07.017>.
19. Open Topography // High-Resolution Topography Data and Tools. URL: [https://portal.opentopography.org/raster?opentopoID=OTSDEM.032021.4326\\_3](https://portal.opentopography.org/raster?opentopoID=OTSDEM.032021.4326_3).
20. Prishchepov A.V. et al. Determinants of agricultural land abandonment in post-Soviet European Russia // Land use policy. 2013. Vol. 30. No. 1. P. 873–884.

## REFERENCES

1. Annenskaya G.N. et al., *Morfologicheskoe izuchenie geografiche-skikh landshaftov* (Morphological study of geographical landscapes), *Landshaftovedenie*, Moscow: Izd-vo AN SSSR, 1963, pp. 5–28.
2. Gvozdetskii N.A. et al., *Fiziko-geograficheskoe raionirovanie Nechernozemnogo tsentra* (Physical and geographical zoning of the Non-chernozem center), Moscow: Izd. Mosk. Univ., 1963, pp. 192–200.
3. Dorozev A.A. et al., *Geografiya Tverskoi oblasti* (Geography of the Tver region), 1992, pp. 31–55.
4. Zvorykin K.V., *Sel'skokhozyaistvennaya tipologiya zemel' dlya kadastrovykh tselei* (Agricultural land typology for cadastral purposes), In: *Voprosy geografii* (Geographical Issues), 1965, S 6.67, pp. 61–82.
5. Milov L.V. et al., *Istoriya Rossii XX – do nachala XXI veka* (The history of Russia XX – to the beginning of the XXI century), Moscow: Eks-mo, 2006, 958 p.
6. Kiryushin V.I. et al., *Agroekologicheskaya otsenka zemel', proektirovaniye adaptivno-landshaftnykh sistem zemledeliya i agrotekh-nologii* (Agroecological assessment of lands, design of adaptive landscape systems of agriculture and agrotechnology), Moscow: FGNU “Rosinformagrotekh”, 2005, 784 p.
7. Kozlov D.N., *Tsifrovoyi landshaftnyi analiz pri krupnomasshtabnom kartografirovaniy struktur pochvennogo pokrova* (Digital landscape analysis for fine-scale mapping of soil cover structures), Moscow: MGU, 2009, 26 p.
8. Kozlov D.N., Sorokina N.P., Traditsii i innovatsii v krupno-masshtabnoi pochvennoi kartografii (Digital landscape analysis for large-scale mapping of soil cover structures), *Tsifrovaya pochvennaya kartografiya: teoreticheskie i eksperimental'nye issledovaniya*, Moscow: Pochvennyi institut im. V.V. Dokuchaeva, 2012, pp. 35–37.
9. Lyuri D.I. et al., *Dinamika sel'skokhozyaistvennykh zemel' Rossii v XX veke i postagrogennoe vosstanovlenie rastitel'nosti i pochv* (Dynamics of agricultural lands in Russia in the 20<sup>th</sup> century and post-agrogenic restoration of soil vegetation), 2010, pp. 28–36.
10. Mamai I.I., *Fizicheskaya geografiya: struktura, ob"ekty i printsipy issledovaniya* (Physical geography: structure, objects and principles of research), *Izvestiya RGO*, 2005, No. 3, pp. 28–36.
11. Matasov V.M., *Izmenenie strukturny zemlepol'zovaniya v landshaftakh Ryazanskoi Meshchery s kontsa XVIII veka: Dis.... kand. geogr. n.* (Changes in the structure of land use in the landscapes of the Ryazan Meschera since the end of the XVIII century, Cand. Geogr. Sci. thesis), Moscow: Lomonosov Moscow State University, 2018, 219 p.

12. Nikolaev V.A., Kul'turnyi landshaft-geoekologicheskaya Sistema (Cultural landscape – geoecological system), *Vestnik MGU. Ser. 5*, 2000, Vol. 5, pp. 3–8.
13. Nikolaev V.A., Kopyl I.V., Sysuev V.V., *Prirodno-antropogennye landshafty (sel'skokhozyaistvennye i lesokhozyaistvennye)* (Natural and anthropogenic landscapes (agricultural and forestry)), 2008, Moscow: Faculty of Geography, Moscow State University, 2008, 158 p.
14. Nikolaev V.A., Kontsepsiya agrolandshafta (The conception of the agricultural landscape), *Vestn. MGU. Ser.5. Geografiya*, 1987, No. 2, pp. 22–27.
15. *Sel'khoz Portal* (Agricultural Portal), URL: [https://sel'khozportal.rf/analizposevnyhploshhadej/?region\\_id=2266&region\\_child\\_id=4585&area=1](https://sel'khozportal.rf/analizposevnyhploshhadej/?region_id=2266&region_child_id=4585&area=1).
16. Hengl T., MacMillan R.A., Predictive soil mapping with R, *OpenGeoHub Foundation*, Wageningen, 2019, pp. 227–273.
17. McBratney A.B., Santos M.L.M., Minasny B., On digital soil mapping, *Geoderma*, 2003, Vol. 117, No. 1–2, pp. 3–52.
18. Minasny B., McBratney A.B., Digital soil mapping: A brief history and some lessons, *Geoderma*, 2016, Vol. 264, Part B–C, pp. 301–311, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.07.017>.
19. Open Topography, *High-resolution topography data and tools*, URL: [https://portal.opentopography.org/raster?opentopoID=OTSDEM.032021.4326\\_3](https://portal.opentopography.org/raster?opentopoID=OTSDEM.032021.4326_3).
20. Prishchepov A.V. et al., Determinants of agricultural land abandonment in post-Soviet European Russia, *Land use policy*, 2013, Vol. 30, No. 1, pp. 873–884.



**Ссылки для цитирования:**

Агуро́ва И.В., Сыщиков Д.В., Березовский А.С. Оценка влияния различных систем землепользования на кислотность почв сельскохозяйственных угодий Донецкой Народной Республики // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2025. Вып. 126. С. 137-155. DOI: 10.19047/0136-1694-2025-126-137-155

**Cite this article as:**

Agurova I.V., Syshchikov D.V., Berezovskiy A.S., Assessment of the impact of various land use systems on soil acidity of agricultural lands in the Donetsk People's Republic, Dokuchaev Soil Bulletin, 2025, V. 126, pp. 137-155, DOI: 10.19047/0136-1694-2025-126-137-155

**Благодарность:**

Работа выполнена в рамках госзадания ФГБНУ Донецкий ботанический сад по теме FREG-2023-0002 “Качественные и функциональные характеристики почв сельскохозяйственных угодий в степной зоне и пути восстановления их биологической продуктивности”, № 123101300198-3.

**Acknowledgments:**

The work was carried out within the framework of the state assignment of FSBSI DBG on the theme FREG-2023-0002 “Qualitative and functional characteristics of agricultural soils in the steppe zone and ways to restore their biological productivity”, No. 123101300198-3.

**Оценка влияния различных систем  
землепользования на кислотность почв  
сельскохозяйственных угодий  
Донецкой Народной Республики**

© 2025 г. И. В. Агуро́ва\*, Д. В. Сыщиков\*\*, А. С. Березовский\*\*\*

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение  
“Донецкий ботанический сад”, Россия,  
ДНР, 283023, Донецк, пр. Ильича, 110,

\*<https://orcid.org/0000-0002-4583-6480>, e-mail: [ir.agur@mail.ru](mailto:ir.agur@mail.ru),

\*\*<https://orcid.org/0000-0003-4044-1129>, e-mail: [2007dmitry@rambler.ru](mailto:2007dmitry@rambler.ru),

\*\*\*<https://orcid.org/0009-0006-1260-1921>, e-mail: [berezovskiias@list.ru](mailto:berezovskiias@list.ru).

*Поступила в редакцию 16.01.2025, после доработки 24.03.2025,  
принята к публикации 13.11.2025*

**Резюме:** Целью настоящих исследований было изучение актуальной, обменной и гидролитической кислотности почв сельскохозяйственных угодий Донецкой Народной Республики. В качестве модельных выбраны участки земель различной степени деградации в восточной и западной частях Шахтерского района Донецкой Народной Республики, где почвенный покров представлен черноземами мало- и среднегумусными слабой и средней степени смытости. Контролем служил участок со степной растительностью (чернозем обыкновенный среднегумусный). При изучении показателя актуальной кислотности в почвах агроценозов модельных участков установлено варьирование значений реакции среды от среднекислой до среднешелочной. Исследование изменения обменной кислотности показало существенное ее превышение на склоновых участках под пшеницей (в 3.6–6.4 раза) по сравнению со значениями плакорной почвы. В наименьшей степени деградационные процессы отразились на значениях обменной кислотности участков, оставленных под паром, а также под овощными культурами, где превышение показателей варьировало от 1.1 до 1.5 раз. На участках под зерновыми культурами значения гидролитической кислотности были существенно выше показателей гидролитической кислотности на контрольном участке (в 4–10 раз). Достоверно неотличимы от контроля были значения гидролитической кислотности в почвах агроценозов под томатами, паром, луком (подпахотный горизонт), что является положительным фактором успешного возделывания широкого ряда сельскохозяйственных культур.

**Ключевые слова:** деградация почв; обменная кислотность; гидролитическая кислотность; актуальная кислотность; смытые почвы.

## **Assessment of the impact of various land use systems on soil acidity of agricultural lands in the Donetsk People's Republic**

© 2025 I. V. Agurova<sup>\*</sup>, D. V. Syshchykov<sup>\*\*</sup>, A. S. Berezovskiy<sup>\*\*\*</sup>

*Federal State Budgetary Scientific Institution “Donetsk botanical garden”,  
110 Illichia aven., Donetsk 283023, DPR, Russian Federation,*

*7 Bld. 2 Pyzhevskiy per., Moscow 119017, Russian Federation,*

*\*<https://orcid.org/0000-0002-4583-6480>, e-mail: [ir.agur@mail.ru](mailto:ir.agur@mail.ru),*

\*\*<https://orcid.org/0000-0003-4044-1129>, e-mail: [2007dmitry@rambler.ru](mailto:2007dmitry@rambler.ru),  
\*\*\*<https://orcid.org/0009-0006-1260-1921>, e-mail: [berezovskias@list.ru](mailto:berezovskias@list.ru).

Received 16.01.2025, Revised 24.03.2025, Accepted 13.11.2025

**Abstract:** The aim of the present research was to study the actual, exchangeable and hydrolytic acidity of the soils of agricultural lands of the Donetsk People's Republic. The model sites were selected on lands of various degradation degrees, laid in the eastern and western parts of the Shakhtyorsk district of the Donetsk People's Republic and covered by low- and medium-humus chernozems with low and medium erosion degrees. The site with steppe vegetation (medium humus chernozem) was chosen as the control one. When studying the actual acidity index in the soils of agrocenoses of model sites, a variation in the pH values from medium acidic to medium alkaline was established. The studying of exchangeable acidity fluctuations in various sites showed a significant excess of indicators in the slope areas under wheat (3.6–6.4 times) compared to the values of plakor soil. To the least extent, degradation processes affected the values of the exchangeable acidity of fallow sites, as well as under vegetable crops, where the excess of indicators ranged from 1.1 to 1.5 times. Hydrolytic acidity values in the areas under crops were significantly higher than hydrolytic acidity values in the control site (4–10 times). The values of hydrolytic acidity in the soils of agrocenoses under tomatoes, fallow, onions (subsurface horizon) were not reliably distinguished from the control ones, which is a positive factor for the successful cultivation of a wide range of crops.

**Keywords:** soil degradation; exchangeable acidity; hydrolytic acidity; actual acidity; degraded soils.

## ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия антропогенное влияние на почвенный покров и биосферу достигло критических величин, нарушив условия для их полноценного функционирования, спровоцировав ряд региональных и глобальных кризисов землепользования. Проблема деградации земель, а также кардинального ухудшения их экологического состояния и функциональных возможностей относится к одним из наиболее опасных и ключевых проблем в системе землепользования (Алманова и др., 2021; Иванов и др., 2024).

Мониторинг состояния земель сельскохозяйственного назначения является неотъемлемой и обязательной составляющей системы рационального землепользования. Длительное сельскохо-

зяйственное использование пахотных угодий приводит к почвоу-  
томлению, снижению содержания основных элементов минераль-  
ного питания в почве и, как следствие, негативно сказывается на  
почвенном плодородии (Мамонтов и др., 2020; Савин и др., 2022).  
Мировой опыт показывает, что высокая продуктивность земледе-  
лия возможна при комплексном учете агрохимических и экологи-  
ческих факторов, необходимых для устойчивого развития расте-  
ний, формирования урожая и недопущения развития деградацион-  
ных процессов в почве (Chaudhari et al., 2010; Estrada et al., 2017).

В случае интенсивного сельскохозяйственного использова-  
ния в черноземах происходят кардинальные изменения, которые  
приводят к отрицательным последствиям, снижая продуктивность  
и плодородие земель. Так, гумусово-аккумулятивный горизонт в  
настоящее время практически превращен в пахотный, а под дей-  
ствием ежегодной механической обработки он дезагрегируется,  
значительно уплотняется и после выпадения атмосферных осадков  
“замыивается” (Семендеева и др., 2015).

Одним из “ключевых” составных элементов почвенного  
плодородия, оказывающим значительное влияние на формирова-  
ние урожая сельскохозяйственных культур, является кислотность  
почв, которая обусловлена многими факторами, но в большинстве  
случаев – литологическим составом почвообразующих пород, со-  
ставом почвенно-поглощающего комплекса (ППК), направлением  
почвообразовательного процесса, степенью эродированности почв  
и хозяйственной деятельностью человека (Чекмарев и др., 2011).

На кислых почвах на 30–40% уменьшается эффективность  
применения удобрений, в продукции интенсивно накапливаются  
радионуклиды и тяжелые металлы, ухудшается ее качество, сни-  
жается устойчивость аgroценозов к неблагоприятным погодным  
условиям (Лукин, 2005). В щелочных почвах, по мнению ряда ав-  
торов, фосфор, кальций, магний, железо и другие элементы пере-  
ходят в нерастворимые соединения и становятся труднодоступ-  
ными для растений (Клименко и др., 2007; Несговорова, Савельев,  
2022).

Актуальная (активная) кислотность обусловлена наличием  
ионов водорода и активностью водорода (протонов) в почвенном  
растворе, она измеряется величиной pH водной вытяжки или вод-

ной суспензии. Величина рН относится к устойчивому генетическому показателю почвы, и любые изменения значений кислотности являются следствием развития деградационных процессов. Потенциальная кислотность (обменная и гидролитическая) связана в основном с наличием ионов водорода и алюминия в поглощенном состоянии в ППК (Вальков и др., 2006; Ганжара, 2001).

Исследования по изучению различных видов кислотности почв земель России проводятся с целью мониторинга состояния агропромышленного комплекса и составления прогноза изменения показателей с течением времени, а также недопущения развития деградации и снижения плодородия (Беспалов, 2015; Захарова, 2017; Зинченко, 2022; Чевердин, Поротиков, 2015; Якушева, Маслова, 2009). В рамках комплексного мониторинга земель сельскохозяйственного назначения нами проведены исследования варьирования значений кислотности деградированных почв Донецкой Народной Республики (Агуррова, Сыщиков, 2023; Сыщиков, Агуррова, 2024). В задачи исследований входило изучение актуальной, обменной и гидролитической кислотности деградированных почв агроценозов (на примере Шахтерского района Донецкой Народной Республики).

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

При исследовании почвенного покрова деградированных агрозоекосистем были выбраны модельные участки, заложенные с учетом таких факторов, как распространенность типа нарушения в пределах района изучения и степень антропогенной трансформации. Отбор проб почвы проводился на протяжении 2024 г. на участках восточной и западной части Шахтерского района Донецкой Народной Республики.

В качестве контроля был выбран участок (№ 1) со степной растительностью (с. Андреевка, Шахтерский район,  $48^{\circ}12'39.80"N$ ;  $38^{\circ}70'76.19"E$ ). Общее проективное покрытие (ОПП) составляет 95%, доминируют *Festuca valesiaca* Schleich. ex Gaudin, *Vinca minor* L., *Euphorbia virgata* Waldst. & Kit., *Stipa grafiana* Steven, *Salvia nutans* L., также представлены *Echium vulgare* L., *Artemisia austriaca* Jacq., *Lathyrus tuberosus* L., *Ajuga genevensis* L., *Achillea pannonica* L., *Tragopogon major* Jacq.,

*Achillea pannonica* Scheele, *Plantago lanceolata* L. Чернозем обыкновенный среднегумусный.

Участки № 2 ( $47^{\circ}94'47.28''N$ ;  $38^{\circ}90'75.75''E$ ), № 3 ( $47^{\circ}55'58.7''N$ ;  $38^{\circ}53'55.3''E$ ), № 4 ( $47^{\circ}55'29.6''N$ ;  $38^{\circ}46'36.6''E$ ) (с. Дмитровка, Шахтерский район, ДНР) – склоновые участки полей под зерновыми культурами (пшеницей – №№ 2, 3 и кукурузой – № 4), загрязненные сорной растительностью: *Ambrosia artemisiifolia* L., *Carduus crispus* L., *Rumex crispus* L., *Senecio vernalis* Waldst & Kit, *Oberna behen* (L.) Ikonn., *Anisantha tectorum* (L.) Nevski. Почвы представлены черноземами обыкновенными малогумусными слабой и средней степени смытости.

Исследуемые участки №№ 5–9 заняты овощными культурами или находятся под паром, расположены в с. Пятиполье, Шахтерский район, ДНР:

№ 5 – под паром, первый год после картофеля ( $48^{\circ}00'51.1''N$ ;  $38^{\circ}06'58.1''E$ );

№ 6 – под паром, первый год после лука ( $48^{\circ}00'54.6''N$   $38^{\circ}07'33.9''E$ );

№ 7 – под томатами ( $48^{\circ}00'53.5''N$ ;  $38^{\circ}07'57.4''E$ );

№ 8 – под луком ( $48^{\circ}01'03.6''N$ ;  $38^{\circ}07'19.6''E$ );

№ 9 – под баклажанами ( $48^{\circ}01'04.3''N$ ;  $38^{\circ}07'56.8''E$ ).

Почвы представлены черноземами обыкновенными мало- и среднегумусными.

Почвы исследованных модельных участков – среднесуглинистые, в структурном отношении – с преобладанием фракций размером более 10 мм и 3–1 мм.

Определение видов растений производили в соответствии с классическими методами (Доброчаева и др., 1987; Остапко и др., 2010).

Описание почвенных разрезов проводили согласно общепринятым методикам (Методические рекомендации..., 1999; Розанов, 2004). Отбор почвенных образцов производили по почвенным горизонтам (Методы почвенной микробиологии и биохимии, 1991).

Актуальная кислотность (рН водной вытяжки) определялась потенциометрически в надосадочной суспензии почвы и воды в соотношении 1 : 5. Гидролитическая кислотность определялась по

Каппену, с использованием в качестве гидролитически щелочной соли уксуснокислого натрия, полученные значения выражались в ммоль экв./100 г почвы. Обменную кислотность определяли по Соколову, извлекая обменные катионы раствором хлористого калия с последующим титрованием фильтрата гидроксидом натрия (Аринушкина, 1970; Практикум по агрохимии..., 2001). Статистическая обработка экспериментальных данных проводилась по общепринятым методам параметрической статистики на 95%-ном уровне значимости по Доспехову (Доспехов, 2011).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

При изучении показателя актуальной кислотности (рН) в почвах агроценозов модельных участков установлено варьирование значений реакции среды от среднекислой до среднешелочной (табл. 1).

Первоисточником любой кислотности в почвах являются водородные ионы угольной и органических кислот, образующихся при разложении органических остатков и выделяемых корнями растений и микроорганизмами. В летний период слабокислая реакция среды (контрольный участок № 1) может быть связана с типом произрастающей растительности, накоплением продуктов выветривания и органического материала, при этом отсутствие карбонатов в составе также способствует некоторому подкислению почв. Однако в данном случае, вероятнее всего, факт повышения кислотности связан с сезонной динамикой, отсутствием возможности вымывания органических кислот в связи с продолжительной летней засухой и соответствующим подкислением среды.

Повышенная кислотность почв на участках под пшеницей и кукурузой (участки №№ 2–3) связана с особенностями рельефа (склоновая поверхность, наличие ложбин и впадин, где происходит концентрация атмосферных осадков), несоблюдением режима внесения физиологически кислых удобрений. Вымывание с осадками из ППК кальция и магния также способствует подкислению почвы, что, естественно, сказывается на плодородии почвы и выращивании сельскохозяйственных культур.

**Таблица 1.** Актуальная кислотность в почвах агроценозов  
**Table 1.** Actual acidity in soils of agrocenoses

Участок/ горизонт	Период активного формирования вегетативной массы		После уборки урожая	
	M	Реакция среды	M	Реакция среды
№ 1 А	6.65	Нейтральная	6.10	Слабокислая
№ 1 В	6.81	Нейтральная	6.15	Слабокислая
№ 2 А	5.56	Среднекислая	6.10	Слабокислая
№ 2 В	5.87	Среднекислая	6.14	Слабокислая
№ 3 А	5.55	Среднекислая	6.45	Слабокислая
№ 3 В	5.72	Среднекислая	6.37	Слабокислая
№ 4 А	6.43	Слабокислая	6.52	Нейтральная
№ 4 В	6.65	Нейтральная	6.56	Нейтральная
№ 5 А	7.95	Слабощелочная	7.18	Нейтральная
№ 5 В	8.47	Среднешелочная	7.30	Нейтральная
№ 6 А	7.93	Слабощелочная	7.70	Слабощелочная
№ 6 В	8.50	Среднешелочная	7.52	Слабощелочная
№ 7 А	7.71	Слабощелочная	7.25	Нейтральная
№ 7 В	8.50	Среднешелочная	7.15	Нейтральная
№ 8 А	7.52	Слабощелочная	7.32	Нейтральная
№ 8 В	8.15	Среднешелочная	7.80	Слабощелочная
№ 9 А	7.52	Слабощелочная	7.35	Нейтральная
№ 9 В	8.35	Среднешелочная	7.45	Слабощелочная

Установлено, что оптимум для выращивания пшеницы находится при значениях pH выше 6.6 (Вальков и др., 2006), т. е. по этому показателю условия являются неблагоприятными для выращивания данной культуры. На участке № 4 условия для выращивания

кукурузы достаточно благоприятны (рН находится в пределах 6–8.5, что является оптимумом для выращивания данной культуры).

На участках №№ 5–9 (под овощными культурами и оставленными под паром) кислотность почвы снижена, по сравнению с контрольным участком, а реакция среды изменялась от нейтральной до среднешелочной, что связано с повышением содержания в почве ионов ОН<sup>-</sup>. Такая кислотность обусловлена наличием в почвенном растворе гидролитически щелочных солей. При описании почвенных разрезов и определении содержания кальция и магния в ППК установлено, что такая пониженная кислотность, а значит, повышенная щелочность обусловлена наличием карбонатов и гидрокарбонатов кальция и магния. Почвы агроценозов с щелочной реакцией среды подвержены обессструктуриванию, что негативно оказывается на их плодородии, в связи с чем выращивание овощных культур на данных участках в будущем может быть затруднено. В особенности требуют усиленного внимания и контроля участки, оставленные под паром, где известкование требуется производить с особой осторожностью, а также использовать другие способы повышения плодородия, например, ежегодно за- пахивая солому, которая будет благоприятно влиять на коллоидную часть чернозема.

Однако следует понимать, что определение актуальной кислотности в почвах дает лишь приближенное представление о состоянии почв, поскольку значения этого показателя весьма вариабельны. Поэтому полную картину дает изучение потенциальной кислотности. С обменной кислотностью связаны режимы органического вещества и элементов минерального питания, подвижность соединений (Зинченко, 2022). Внесение органических удобрений, как правило, способствует увеличению емкости катионного обмена и суммы поглощенных катионов, снижению обменной и гидролитической кислотностей и возрастанию степени насыщенности почвы основаниями. Применение минеральных удобрений приводит к подкислению почвы, снижению емкости поглощения и содержания обменных катионов кальция и магния. С другой стороны, как показывают исследования ряда авторов, отрицательные последствия применения минеральных удобрений часто переоцениваются. Характер действия минеральных удобрений на физико-

химические свойства почвы зависит от природно-территориального комплекса, форм и норм вносимых удобрений и длительностью их применения (Шеуджен, 2018).

При изучении обменной кислотности установлено существенное превышение ее значений на почвах склоновых участков под пшеницей (в 3.6–6.4 раза) в сравнении с показателями целинной почвы (участок № 1) (табл. 2).

В 2.6–2.8 раз показатели обменной кислотности были превышены на участке № 4 (склоновый участок под кукурузой), что также является одной из предпосылок развития деградационных процессов как в ППК, так и в почве в целом. Основные причины существенного повышения значений обменной кислотности связаны с интенсивной обработкой почвы и нерациональным внесением минеральных удобрений, загрязнением посевов сорнорудеральной растительностью. Подкисление среды и повышенная кислотность на этих участках способствуют увеличению числа ионов водорода и алюминия, что, соответственно, вызывает повышение обменной кислотности. Наименьшими значениями обменной кислотности характеризовались участки, оставленные под паром, а также отобранные для выращивания овощных культур (участки №№ 5–9), где превышение варьировало от 1.1 до 1.5 раз по сравнению с контролем. В вариантах под паром (участок № 6 – горизонт В) значения обменной кислотности достоверно не отличались от таковых на целинном участке, что благоприятно сказывается на самой почве, ее агрофизических и агрохимических характеристиках. Это подтверждается исследованиями актуальной кислотности почв под овощными культурами, где фиксировалась реакция среды от нейтральной до слабощелочной.

По показателю гидролитической кислотности сохранялась тенденция, схожая с распределением почв по значениям обменной кислотности (табл. 3).

Для участков №№ 2–3 значения гидролитической кислотности были существенно выше показателей гидролитической кислотности целинной почвы (более чем в 10 раз), в данном случае отмечаем крайне неблагоприятные условия для произрастания и получения высоких урожаев пшеницы.

**Таблица 2.** Обменная кислотность (ммоль экв./100 г почвы) в почвах агроценозов

**Table 2.** Exchangeable acidity (mmol eq./100 g soil) in soils of agrocenoses

Участок / горизонт	M ± m	% к контролю	Tst
№ 1 А	0.118 ± 0.007	—	—
№ 1 В	0.079 ± 0.004	—	—
№ 2 А	0.754 ± 0.02*	640.0	29.6
№ 2 В	0.314 ± 0.01*	400.0	21.2
№ 3 А	0.73 ± 0.007*	620.0	63.7
№ 3 В	0.279 ± 0.004*	355.0	36.1
№ 4 А	0.33 ± 0.007*	280.0	22.1
№ 4 В	0.204 ± 0.008*	260.0	14.3
№ 5 А	0.173 ± 0.01*	146.7	4.43
№ 5 В	0.106 ± 0.007*	135.0	3.5
№ 6 А	0.141 ± 0.007*	120.0	2.45
№ 6 В	0.088 ± 0.003	112.5	1.89
№ 7 А	0.192 ± 0.01*	163.3	6.0
№ 7 В	0.098 ± 0.004*	125.0	3.54
№ 8 А	0.202 ± 0.002*	171.7	11.9
№ 8 В	0.104 ± 0.004*	133.0	4.78
№ 9 А	0.153 ± 0.007*	130.0	3.67
№ 9 В	0.106 ± 0.007*	135.0	3.5

**Примечание.** В этой и таблице 3: M – среднее значение признака, m – ошибка среднего, % – процент превышения значений по отношению к аналогичным почвенным горизонтам участка № 1, Tst – значения критерия Стьюдента, \* – различия статистически достоверны при  $p < 0.05$ .

**Note.** Here and after: M – the average value of the characteristic, m – the error of the mean, % – the percentage of values exceeding those of similar soil horizons in site No. 1, Tst – the Student's t test value, \* – the differences are statistically significant at  $p < 0.05$ .

**Таблица 3.** Гидролитическая кислотность (ммоль экв./100 г почвы) в почвах агроценозов

**Table 3.** Hydrolytic acidity (mmol eq./100 g soil) in soils of agrocenoses

Участок / горизонт	M ± m	% к контролю	Tst
№ 1 А	0.62 ± 0.051	—	—
№ 1 В	0.47 ± 0.078	—	—
№ 2 А	6.26 ± 0.106*	1009.5	47.8
№ 2 В	4.9 ± 0.156*	1037.5	23.6
№ 3 А	6.41 ± 0.078*	1033.3	61.9
№ 3 В	4.96 ± 0.102*	1050.0	34.9
№ 4 А	2.3 ± 0.051*	371.4	23.3
№ 4 В	1.89 ± 0.078*	400.0	12.8
№ 5 А	0.8 ± 0.051*	128.6	2.45
№ 5 В	0.53 ± 0.051	112.5	0.63
№ 6 А	0.63 ± 0.015	102.4	0.28
№ 6 В	0.46 ± 0.015	96.9	0.19
№ 7 А	0.71 ± 0.051	114.3	1.22
№ 7 В	0.38 ± 0.03	81.3	1.06
№ 8 А	0.83 ± 0.03*	133.3	3.5
№ 8 В	0.56 ± 0.03	118.8	1.06
№ 9 А	0.86 ± 0.03*	138.1	4.0
№ 9 В	0.65 ± 0.03*	137.5	2.12

Сохранялась тенденция повышенных значений гидролитической кислотности на участке под кукурузой (превышение относительно значений чернозема обыкновенного контрольного участка составило 3.7–4.0 раза).

Достоверно неотличимы от контроля были значения гидролитической кислотности в почвах агроценозов под томатами (участок № 7), под паром (участки №№ 5–6), под луком (подпахотный горизонт), что соответствует оптимальным условиям для возделывания данных сельскохозяйственных культур.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При изучении актуальной кислотности ( $\text{pH}$ ) в почвах агроценозов мониторинговых участков установлено варьирование значений реакции среды от среднекислой до среднешелочной. Повышенная кислотность почв на участках под пшеницей и кукурузой связана с особенностями рельефа (склоновая поверхность, наличие ложбин и впадин, где происходит концентрация атмосферных осадков), несоблюдением режима внесения физиологически кислых удобрений.

При изучении обменной кислотности установлено существенное превышение ее показателей на склоновых участках под пшеницей (в 3.6–6.4 раза) по сравнению со значениями целинной почвы, что, безусловно, сказывается на плодородии почв, их физических характеристиках, урожае сельскохозяйственных культур. В наименьшей степени деградационные процессы отразились на значениях обменной кислотности участков, оставленных под паром, а также отобранных для выращивания овощных культур (участки №№ 5–9), где превышение показателей варьировало от 1.1 до 1.5 раз, в вариантах под паром участка № 6 (горизонт В) значения достоверно не отличались от таковых целинного участка, что благоприятно сказывается на самой почве, ее агрофизических и агрохимических характеристиках. Это подтверждается исследованиями актуальной кислотности почв под овощными культурами, где фиксировалась реакция среды от нейтральной до среднешелочной.

Для участков №№ 2–3 значения гидролитической кислотности были существенно выше показателей гидролитической кислотности целинной почвы (более чем в 10 раз), что создает крайне неблагоприятные условия для произрастания пшеницы и получения ее высоких урожаев. Сохранялась тенденция повышенных значений гидролитической кислотности на участке под кукурузой

(превышение над значениями чернозема обыкновенного контрольного участка – в 3.7–4.0 раза). Достоверно не отличимы от контроля были значения гидролитической кислотности в почвах агроценозов под томатами, паром, луком (подпахотный горизонт), что соответствует оптимальным условиям для возделывания данных сельскохозяйственных культур.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агурова И.В., Сыщиков Д.В. Кислотность деградированных почв сельскохозяйственных угодий Донецкой Народной Республики // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. 2023. № 3. С. 125–131. DOI: <https://doi.org/10.55959/MSU0137-0944-17-2023-78-3-125-131>
2. Алманова Ж.С., Кенжегулова С.О., Калакова М.Е. Современное состояние почвенного плодородия пахотных почв Федоровского района Костанайской области // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2021. № 9. С. 81–86.
3. Аринушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во МГУ, 1970. 487 с.
4. Беспалов В.А. Изменение реакции среды черноземных почв Каменной степи в результате агрогенеза // Инновационные технологии в адаптивно-ландшафтном земледелии: сборник научных докладов Международной научно-практической конференции. Сузdalь: Изд-во “ПресСто”, 2015. Книга 2. С. 56–59.
5. Вальков В.Ф., Казеев К.Ш., Колесников С.И. Почвоведение. М.: ИКЦ “МарТ”. Ростов н/Д: Издательский центр “МарТ”, 2006. 496 с.
6. Ганжара Н.Ф. Почвоведение. М.: Агроконсалт, 2001. 392 с.
7. Доброочаева Д.Н., Котов М.И., Прокудин Ю.Н. Определитель высших растений Украины. К.: Наукова думка, 1987. 548 с.
8. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). М.: Альянс, 2011. 350 с.
9. Захарова И.А. Изменение кислотности черноземных почв Челябинской области // АПК России. 2017. № 4 (24). С. 940–943.
10. Зинченко С.И. Оценка варьирования обменной кислотности в серых лесных почвах при различных системах обработки // Владимирский земледелец. 2022. № 4 (102). С. 13–17.
11. Иванов А.Л., Столбовой В.С., Гребенников А.М., Духанин Ю.А. Загрязнение и пригодность почв для выращивания экологически чистой

- сельскохозяйственной продукции в РФ // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2024. Вып. 118. С. 5–20. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2024-118-5-20>.
12. Клименко О.И., Иванова А.С., Клименко Н.И. Влияние щелочности почвы на подвижность элементов питания растений // Бюллетень государственного Никитского Ботанического сада. 2007. № 95. С. 46–50.
13. Лукин С.В. Агроэкологическое состояние пахотных почв Белгородской области // Экологический мониторинг. 2005. № 6. С. 118–123.
14. Мамонтов В.Г., Артемьевая З.С., Лазарев В.И., Родионова Л.П., Крылов В.А., Ахмедзянова Р.Р. Сравнительная характеристика свойств целинного, пахотного и залежного чернозема типичного Курской области // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2020. Вып. 101. С. 182–201. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-101-182-201>.
15. Методические рекомендации по морфологическому описанию почв / сост. Дюкарев А.Г., Пологова Н.Н., Герасько Л.И. Томск: Изд-во СО РАН, 1999. 39 с.
16. Методы почвенной микробиологии и биохимии / под. ред. Звягинцева Д.Г. М.: Изд-во МГУ, 1991. 304 с.
17. Несголовова Н.П., Савельев В.Г. Кислотность почв как фактор формирования видового состава фитоценозов некоторых охраняемых территорий Курганской области России // Успехи современного естествознания. 2022. № 6. С. 35–40. DOI: <https://doi.org/10.17513/use.37838>.
18. Остапко В.М., Бойко А.В., Мосякин С.Л. Сосудистые растения юго-востока Украины. Донецк: Изд-во “Ноулидж”, 2010. 247 с.
19. Практикум по агрохимии / под ред. Минеева В.Г. М.: Изд-во МГУ, 2001. 689 с.
20. Розанов Б.Г. Морфология почв. М.: Академический проект, 2004. 432 с.
21. Савин И.Ю., Бербеков С.А., Тутукова Д.А. Комплексная оценка неоднородности почвенного покрова по состоянию посевов // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2022. Вып. 113. С. 31–57. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2022-113-31-57>.
22. Семендеева Н.В., Карловец Л.А., Крупская Т.Н. Изменение свойств чернозема выщелоченного Новосибирского Приобья при сельскохозяйственном использовании. Новосибирск: ИЦ НГАУ “Золотой колос”, 2015. 183 с.
23. Сыциков Д.В., Агурова И.В. Кислотность почв сельскохозяйственных

- угодий Шахтерского района Донецкой Народной Республики // Промышленная ботаника. 2024. № 1 (24). С. 47–54. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.10930826>.
24. Чевердин Ю.И., Поротиков И.Ф. Влияние антропогенных факторов на реакцию почвенной среды черноземов // Агрохимия. 2015. № 8. С. 15–22.
25. Чекмарев П.А., Лукин С.В., Сискевич Ю.И., Юмашев Н.П., Корчагин В.И., Хижняков А.Н. Мониторинг кислотности пахотных почв Центрально-черноземного района // Достижения науки и техники АПК. 2011. № 7. С. 6–8.
26. Шеуджен А.Х. Агробиогеохимия чернозема. Майкоп: ОАО “Полиграф-Юг”, 2018. 308 с.
27. Якушева Т.Г., Маслова И.Я. Актуальная кислотность почв при паровании и выращивании растений // Плодородие. 2009. № 5 (50). С. 46–48.
28. Chaudhari S.K., Biswas P.P., Kapil H. Soil health and fertility // Soils of India. World Soils Book Series. Springer, Cham. 2020. P. 215–231. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-31082-0\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-030-31082-0_11).
29. Estrada-Herrera I.R., Hidalgo-Moreno C., Guzman-Plazola R., Suarez J.J., Navarro-Garza H., Etchevers J.D. Soil quality indicators to evaluate soil fertility // Agrociencia. 2017. Vol. 51 (8). P. 813–831.

## REFERENCES

1. Agurova I.V., Syshchikov D.V., Kislotnost' degradirovannykh pochv sel'skokhozyaistvennykh ugodiий Donetskoi Narodnoi Respubliki (Acidity of degraded soils of agricultural lands of the Donetsk People's Republic), *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 17: Pochvovedenie*, 2023, No. 3, pp. 125–131, DOI: <https://doi.org/10.55959/MSU0137-0944-17-2023-78-3-125-131>.
2. Almanova Zh.S., Kenzhegulova S.O., Kalakova M.E., Sovremennoe sostoyanie pochvennogo plodorodiya pakhotnykh pochv Fedorovskogo raiona Kostanaiskoi oblasti (Current state of soil fertility of arable soils of Fedorovsky district of Kostanay region), *Bulletin of Kursk State Agricultural Academy*, 2021, No. 9, pp. 81–86.
3. Arinushkina E.V., *Rukovodstvo po khimicheskому analizu pochv* (Manual of chemical analysis of soils), Moscow: Izd-vo MGU, 1970, 487 p.
4. Bespalov V.A., Izmenenie reaktsii sredy chernozemnykh pochvy kamennoi stepi v rezul'tate agrogeneza (Changes in the reaction of the environment of chernozem soils of the stone steppe as a result of agrogenesis), *Innovatsionnye tekhnologii v adaptivno-landscape zemledelii* (Innovative

- technologies in adaptive landscape agriculture), Suzdal: Izd-vo PresSto, 2015, pp. 56–59.
5. Val'kov V.F., Kazeev K.Sh., Kolesnikov S.I., *Pochvovedenie* (Soil science), Moscow: Izd-vo MarT, Rostov-on-Don: Izd-vo MarT, 2006, 496 p.
6. Ganzhara N.F., *Pochvovedenie* (Soil science), Moscow: Izd-vo Agrokonsalt, 2001, 392 p.
7. Dobrochaeva D.N., Kotov M.I., Prokudin Yu.N., *Opredelitel' vysshikh rastenii Ukrayiny* (Identifier of higher plants of Ukraine), Kiev: Izd-vo Naukova dumka, 1987, 548 p.
8. Dospekhov B.A., *Metodika polevogo opyta (s osnovami statisticheskoi obrabotki rezul'tatov issledovanii)* (Field experience methodology (with the basics of statistical processing of research results)), Moscow: Izd-vo Al'yans, 2011, 350 p.
9. Zakharova I.A., Izmenenie kislotnosti chernozemnykh pochv Chelyabinskoi oblasti (Changes in acidity of chernozem soils in the Chelyabinsk region), *APK Rossii*, 2017, No. 4 (24), pp. 940–943.
10. Zinchenko S.I., Otsenka var'irovaniya obmennoi kislotnosti v serykh lesnykh pochvakh pri razlichnykh sistemakh obrabotki (Evaluation of variation in exchangeable acidity in grey forest soils under different cultivation systems), *Vladimirskii zemledelets*, 2022, No. 4 (102), pp. 13–17.
11. Ivanov A.L., Stolbovoy V.S., Grebennikov A.M., Dukhanin Yu.A., Contamination and suitability of soils for growing bio products in Russia, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2024, Vol. 118, pp. 5–20, DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2024-118-5-20>.
12. Klimenko O.I., Ivanova A.S., Klimenko N.I., Vliyanie shchelochnosti pochvy na podvizhnost' elementov pitaniya rastenii (The influence of soil alkalinity on the mobility of plant nutrients), *Byulleten' gosudarstvennogo Nikitskogo Botanicheskogo sada*, 2007, No. 95, pp. 46–50.
13. Lukin S.V., Agroekologicheskoe sostoyanie pakhotnykh pochv Belgorodskoi oblasti (Agroecological state of arable soils of the Belgorod region), *Ekologicheskii monitoring*, 2005, No. 6, pp. 118–123.
14. Mamontov V.G., Artemyeva Z.S., Lazarev V.I., Rodionova L.P., Krylov V.A., Ahmetzyanova R.R., Comparative characteristics of the properties of Halpic Chernozem of the Kursk Region of different land use, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2020, Vol. 101, pp. 182–201, DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-101-182-201>.
15. Metodicheskie rekomendatsii po morfologicheskому opisaniyu pochv (Guidelines for the morphological description of soils), sost. A.G. Dyukarev, N.N. Pologova, L.I. Geras'ko, Tomsk: Izd-vo "SO RAN", 1999, 39 p.
16. Metody pochvennoi mikrobiologii i biokhimii (Methods of soil

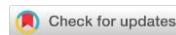
- microbiology and biochemistry), pod. red. D.G. Zvyagintseva, Moscow: Izd-vo MGU, 1991, 304 p.
17. Nesgovorova N.P., Savel'ev V.G., Kislotnost' pochv kak faktor formirovaniya vidovogo sostava fitotsenozov nekotorykh okhranyaemykh territorii Kurganskoi oblasti Rossii (Soil acidity as a factor in the formation of species composition of phytocenoses in some protected areas of the Kurgan region of Russia), *Uspekhi sovremennoego estestvoznaniya*, 2022, No. 6, pp. 35–40, DOI: <https://doi.org/10.17513/use.37838>.
18. Ostapko V.M., Boiko A.V., Mosyakin S.L., *Sosudistye rasteniya yugo-vostoka Ukrayiny* (Vascular plants of the south-east of Ukraine), Donetsk: Izd-vo "Noulidzh", 2010, 247 p.
19. *Praktikum po agrokhimii* (Workshop on agricultural chemistry), pod red. V.G. Mineeva, Moscow: Izd-vo MGU, 2001, 689 p.
20. Rozanov B.G., *Morfologiya pochv* (Soil morphology), Moscow: Isd-vo Akademicheskii proekt, 2004, 432 p.
21. Savin I.Yu., Berbekov S.A., Tutukova D.A., Comprehensive assessment of soil heterogeneity by crop canopy status, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2022, Vol. 113, pp. 31–57, DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2022-113-31-57>.
22. Semendyaeva N.V., Karlovets L.A., Krupskaya T.N., *Izmenenie svoistv chernozema v yushchelochennom Novosibirskogo Priob'ya pri sel'skokhozyaistvennom ispol'zovanii* (Changes in the properties of leached chernozem of the Novosibirsk Priobye region during agricultural use), Novosibirsk: Izd-vo ITs NGAU "Zolotoi kolos", 2015, 183 p.
23. Syshchikov D.V., Agurova I.V., Kislotnost' pochv sel'skokhozyaistvennykh ugodii Shakterskogo raiona Donetskoi Narodnoi Respubliki (Acidity of agricultural soils in Shakhtarsk district of Donetsk People's Republic), *Promyshlennaya botanika*, 2024, No. 1, Vol. 24, pp. 47–54, DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.10930826>.
24. Cheverdin Yu.I., Porotikov I.F., Vliyanie antropogennykh faktorov na reaktsiyu pochvennoi sredy chernozemov (The influence of anthropogenic factors on the reaction of the soil environment of chernozems), *Agrokhimiya*, 2015, No. 8, pp. 15–22.
25. Chekmarev P.A., Lukin S.V., Siskevich Yu.I., Yumashev N.P., Korchagin V.I., Khizhnyakov A.N., Monitoring kislotnosti pakhotnykh pochv Tsentral'no-chernozemnogo raiona (Monitoring the acidity of arable soils of the Central Black Earth Region), *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*, 2011, No. 7, pp. 6–8.
26. Sheudzhen A.Kh., *Agrobiogeokhimiya chernozema* (Agrobiogeochemistry of chernozem), Maykop: OAO "Poligraf-Yug", 2018, 308 p.
27. Yakusheva T.G., Maslova I.Ya., Aktual'naya kislotnost' pochv pri

- parovanii i vyrashchivaniia rastenii (Actual soil acidity during fallowing and growing plants), *Plodorodie*, 2009, No. 5 (50), pp. 46–48.
28. Chaudhari S.K., Biswas P.P., Kapil H., Soil health and fertility, *Soils of India, World Soils Book Series Springer, Cham*, 2020, pp. 215–231, DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-31082-0\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-030-31082-0_11).
29. Estrada-Herrera I.R., Hidalgo-Moreno C., Guzman-Plazola R., Suarez J.J., Navarro-Garza H., Etchevers J.D., Soil quality indicators to evaluate soil fertility, *Agrociencia*, 2017, Vol. 51, No. 8, pp. 813– 831.

УДК 579.26:631.46



DOI: 10.19047/0136-1694-2025-126-156-203



### Ссылки для цитирования:

Семенов М.В., Никитин Д.А., Леонов В.Д., Пинчук И.П., Тхакахова А.К., Ксенофонтова Н.А., Хитров Н.Б. Оценка микробного пула углерода в черноземе и дерново-подзолистой почве разных типов сельскохозяйственного землепользования методом люминесцентной микроскопии // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2025. Вып. 126. С. 156-203. DOI: 10.19047/0136-1694-2025-126-156-203

### Cite this article as:

Semenov M.V., Nikitin D.A., Leonov V.D., Pinchuk I.P., Tkakhakova A.K., Ksenofontova N.A., Khitrov N.B., Assessment of microbial carbon pool in chernozem and sod-podzolic soil of different types of agricultural land use by luminescence microscopy method, Dokuchaev Soil Bulletin, 2025, V. 126, pp. 156-203, DOI: 10.19047/0136-1694-2025-126-156-203

### Благодарность:

Лабораторные исследования выполнены молодежной лабораторией Почвенного углерода и микробной экологии в рамках госзадания “Механизмы микробного преобразования секвестрированного углерода в почвах агроэкосистем” (№ FGUR-2025-0011). Полевые работы выполнены в рамках реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения “Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ” (Консорциум № 4 “Углерод в экосистемах: мониторинг”, Соглашение № ВИП ГЗ/24-4 от 11 марта 2024 г.).

Авторы благодарят Лозбенева Н.И., Шилова П.М. и Филя П.П. за помощь в проведении полевых работ и отбор почвенных образцов.

### Acknowledgments:

The laboratory research was conducted by the Soil Carbon and Microbial Ecology Laboratory for Young Scientists as part of the state assignment “Mechanisms of microbial transformation of sequestered carbon in soils of agroecosystems” (No. FGUR-2025-0011). Field work was conducted as part of the implementation of the key national innovation project “Unified National System for Monitoring Climate-Active Substances” (Consortium No. 4 “Carbon in Ecosystems: Monitoring”, Agreement No. VIP GZ/24-4 dated March 11, 2024).

The authors thank N.I. Lozbenev, P.M. Shilov, and P.P. Fil for their assistance with the field work and soil sampling.

# Оценка микробного пула углерода в черноземе и дерново-подзолистой почве разных типов сельскохозяйственного землепользования методом люминесцентной микроскопии

© 2025 г. М. В. Семенов<sup>1\*</sup>, Д. А. Никитин<sup>1\*\*</sup>, В. Д. Леонов<sup>1,2\*\*\*</sup>,  
И. П. Пинчук<sup>1\*\*\*\*</sup>, А. К. Тхакахова<sup>1\*\*\*\*\*</sup>,  
Н. А. Ксенофонтова<sup>1\*\*\*\*\*</sup>, Н. Б. Хитров<sup>1\*\*\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>ФИЦ “Почвенный институт им. В.В. Докучаева”, Россия,  
119017, Москва, Пыжевский пер, 7, стр. 2,

\* <https://orcid.org/0000-0001-6811-5793>,

e-mail: [mikhail.v.semenov@gmail.com](mailto:mikhail.v.semenov@gmail.com),

\*\* <https://orcid.org/0000-0003-1842-1754>,

\*\*\* <https://orcid.org/0000-0003-1519-9684>,

\*\*\*\* <https://orcid.org/0000-0002-4205-6083>,

\*\*\*\*\* <https://orcid.org/0000-0001-9375-2364>,

\*\*\*\*\* <https://orcid.org/0000-0003-1317-5101>,

\*\*\*\*\* <https://orcid.org/0000-0001-5151-5109>.

<sup>2</sup>Институт проблем экологии и эволюции имени А.Н. Северцова РАН,  
Россия, 119071, Москва, Ленинский проспект, 33.

Поступила в редакцию 30.06.2024, после доработки 07.10.2024,  
принята к публикации 13.11.2025

**Резюме:** Углерод микробной биомассы ( $C_{мик}$ ) является биологически активным пулом почвенного органического вещества и чувствительным индикатором, реагирующим на изменения в землепользовании гораздо раньше, чем содержание общего органического углерода и других пулов в его составе. Метод люминесцентной микроскопии позволяет оценивать не только общее содержание  $C_{мик}$ , но и определять структуру микробной биомассы: количество спор и длину мицелия грибов, а также количество бактериальных клеток и гиф актиномицетов. Целью исследования было оценить структуру микробного пула углерода в профилях чернозема типичного и дерново-подзолистой почвы в зависимости от типа сельскохозяйственного землепользования (сенохлев, залежь, пашня, пастбище) методом люминесцентной микроскопии. Микробный пул углерода в поверхностном слое дерново-подзолистой почвы составлял от 258 до 446 мкг/г почвы в зависимости от типа землепользования, в черноземе – 387 мкг/г для почвы залежи и 161 мкг/г для почвы пашни. До глубины 30 см  $C_{мик}$  в черноземе залежи был в 1.5–3 раза выше по

сравнению с пашней. В более глубоких горизонтах различия между разными землепользованиями становились менее явными, но сохранялись для ряда микробиологических показателей. В микробном пуле углерода обеих почв полностью преобладал (97–99%) грибной компонент, представленный преимущественно мицелием. Длина мицелия грибов в дерново-подзолистой почве и черноземе уменьшалась с глубиной на порядок от сотен м/г к десяткам м/г почвы. Большая часть показателей структуры микробного пула углерода (численность грибов, длина мицелия грибов и актиномицетов, биомасса прокариот) были выше в черноземе залежи по сравнению с пашней, однако эти закономерности не наблюдались для дерново-подзолистой почвы. Биомасса и доля прокариот, а также длина мицелия были отмечены как показатели структуры микробного пула углерода, определяемые методом люминесцентной микроскопии, которые ассоциировались с разными типами землепользования для обоих типов почв. Очень высокие значения соотношений грибы/бактерии, вероятно, обусловлены недоучетом биомассы бактериальных клеток используемым методом. Несмотря на выявленные ограничения метода, люминесцентная микроскопия может быть использована в качестве дополнения к более точным методам оценки микробного пула углерода, позволяя определить размеры и структуру грибной биомассы в почвах разных типов сельскохозяйственного землепользования.

**Ключевые слова:** биомасса микроорганизмов; прокариоты; грибы; мицелий; споры; пашня; залежь; сенокос; пастбище.

## **Assessment of microbial carbon pool in chernozem and sod-podzolic soil of different types of agricultural land use by luminescence microscopy method**

© 2025 M. V. Semenov<sup>1\*</sup>, D. A. Nikitin<sup>1\*\*</sup>, V. D. Leonov<sup>1,2\*\*\*</sup>,  
I. P. Pinchuk<sup>1\*\*\*\*</sup>, A. K. Tkhkakhova<sup>1\*\*\*\*\*</sup>,  
N. A. Ksenofontova<sup>1\*\*\*\*\*</sup>, N. B. Khitrov<sup>1\*\*\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>Federal Research Centre “V.V. Dokuchaev Soil Science Institute”,  
7 Bld. 2 Pyzhevskiy per., Moscow 119017, Russian Federation,

\*<https://orcid.org/0000-0001-6811-5793>,

e-mail: [mikhail.v.semenov@gmail.com](mailto:mikhail.v.semenov@gmail.com),

\*\*<https://orcid.org/0000-0003-1842-1754>,

\*\*\*<https://orcid.org/0000-0003-1519-9684>,

\*\*\*\* <https://orcid.org/0000-0002-4205-6083>,  
\*\*\*\*\* <https://orcid.org/0000-0001-9375-2364>,  
\*\*\*\*\* <https://orcid.org/0000-0003-1317-5101>,  
\*\*\*\*\* <https://orcid.org/0000-0001-5151-5109>.

<sup>2</sup>A.N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution  
of the Russian Academy of Sciences,

33 Leninskiy prospekt, Moscow 119071, Russian Federation.

Received 30.06.2024, Revised 07.10.2024, Accepted 13.11.2025

**Abstract:** Microbial biomass carbon ( $C_{mic}$ ) is a biologically active pool of soil organic matter and a sensitive indicator that responds to changes in land use much earlier than total organic carbon content and other pools within it. The luminescent microscopy method allows assessing not only the total content of  $C_{mic}$  but also the structure of microbial biomass: the number of spores and the length of fungal mycelium, as well as the number of bacterial cells and actinomycete hyphae. The aim of the study was to determine the structure of the microbial carbon pool in the profiles of chernozem and sod-podzolic soils depending on the type of agricultural use (hayfield, abandoned land, arable land, pasture) using the luminescent microscopy method. The microbial carbon pool in the surface layer of sod-podzolic soil ranged from 260 to 450  $\mu\text{g/g}$  soil depending on the type of land use, in chernozem – 450  $\mu\text{g/g}$  for abandoned land and 190  $\mu\text{g/g}$  for arable land. Down to the depth of 30 cm,  $C_{mic}$  in chernozem under abandoned land was 1.5–3 times higher compared to arable land. In deeper horizons, differences between various land use types became less pronounced but persisted for a number of microbiological indicators. The fungal component, predominantly represented by mycelium, completely dominated (97–99%) the microbial carbon pool in both soils. The length of fungal mycelium in sod-podzolic soil and chernozem decreased by an order of magnitude with depth from hundreds of  $\text{m/g}$  to tens of  $\text{m/g}$  soil. Most indicators of the structure of the microbial carbon pool (fungal abundance, mycelium length of fungi and actinomycetes, prokaryotic biomass) were higher in chernozem under abandoned land compared to arable land; however, these patterns were not observed for sod-podzolic soil. Prokaryotic biomass and share, as well as mycelium length, were noted as the only indicators of the microbial carbon pool structure determined by the luminescent microscopy method that were associated with different types of land use for both considered soils. Very high fungi/bacteria ratios are likely due to the underestimation of bacterial cell biomass by the method used. Despite the identified limitations of the method, luminescent microscopy can be used as a supplement to more accurate methods for assessing the microbial

carbon pool, allowing the determination of the size and structure of fungal biomass in soils of different types of agricultural land use.

**Keywords:** microbial biomass; prokaryotes; fungi; mycelium; spores; arable land; abandoned land; hayfield; pasture.

## ВВЕДЕНИЕ

Почвенное органическое вещество (ПОВ) – крупнейший резервуар углерода на планете, важный депозитарий питательных элементов, основа плодородия и развития сельского хозяйства (Семенов, Когут, 2015; Liang et al., 2017). Одним из главных факторов, определяющих уровень ПОВ является тип землепользования (Semenov et al., 2018; Семенов и др., 2023). Его смена в первую очередь влияет на растительный покров, характеристики углеродного пула, агрохимические и физико-химические свойства почвы, плодородие (Семенов, Когут, 2015), а также структуру пулов ПОВ и почвенного микробиома (Добровольская и др., 2015; Лебедева и др., 2024). Углерод микробной биомассы ( $C_{\text{мик}}$ ) является важным биологически активным пулом лабильного ПОВ, так как он прямо и косвенно воздействует на многие ферментативные, энергетические и биогеохимические процессы в почве, определяя скорость разложения ПОВ и интенсивность круговорота макро- и микроэлементов, секвестрацию и минерализацию органического углерода (Семенов, Когут, 2015; Добровольская и др., 2015; Благодатская и др., 2016; Семенов и др., 2013, 2018, 2019). Доля микробного пула в составе общего органического углерода ( $C_{\text{опт}}$ ) обычно составляет 1–5%, при этом до 50–55%  $C_{\text{опт}}$  может иметь микробное происхождение (Семенов, Когут, 2015; Liang et al., 2019; Angst et al., 2021; Никитин и др., 2022). Также  $C_{\text{мик}}$  является чувствительным индикатором трансформации и деградации ПОВ (Благодатская и др., 2016; Семенов и др., 2013, 2019; Никитин и др., 2022), откликающимся на изменения в землепользовании гораздо раньше, чем содержание  $C_{\text{опт}}$  и других пулов в его составе (Курганова и др., 2009; Сушко и др., 2019; Семенов и др., 2023; Никитин и др., 2023). Поскольку влияние землепользования на запасы ПОВ проявляется замедленно, необходимы более чувствительные индикаторы, каковым является микробный пул углерода (Семенов, 2020; Никитин и др., 2023).

Определение микробного пула углерода возможно с помощью широкого спектра подходов – прямых, физиологических, биохимических, биомаркерных и т. д. (Благодатская и др., 2016; Семенов и др., 2013, 2019, 2016; Никитин и др., 2022). Наиболее распространенным прямым методом оценки  $C_{\text{мик}}$  служит люминесцентная микроскопия, которая позволяет оценить численность клеток микроорганизмов непосредственно в почве (Звягинцев, 1991; Благодатская и др., 2016; Полянская и др., 2017, 2020). Кроме того, люминесцентная микроскопия позволяет определить не только величину микробной биомассы, но и ее морфологию и структуру (численность, размер и форму клеток, длину мицелия, соотношение мицелий/споры и грибы/бактерии), которые напрямую связаны с процессами трансформации и минерализации ПОВ (Звягинцев, 1991; Добровольская и др., 2015; Семенов и др., 2023). Доминирование микробиоты и высокие значения отношения грибы/прокариоты характерны для почв с большим секвестрирующим потенциалом и низким C/N, а уменьшение отношения грибы/бактерии говорит о снижении секвестрации углерода в почве (Семенов и др., 2023; Никитин и др., 2023). Тем не менее оценка индикаторной роли показателей микробного пула углерода и его структуры, получаемых с помощью люминесцентной микроскопии, до сих пор не проводилась для почв разных типов сельскохозяйственного использования.

Целью исследования была оценка структуры микробной биомассы в профилях чернозема и дерново-подзолистой почвы разных типов сельскохозяйственного землепользования (сенокос, залежь, пашня, пастбище) методом люминесцентной микроскопии.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Первая группа объектов исследования находилась на полях ВНИИМЗ в Калининском районе Тверской области (пос. Эммаусс). Почвенный покров представлен дерново-подзолистыми почвами разной степени оглеения в зависимости от положения в элементах мезорельефа. На большей части поля в 1980-х годах проводились осушительные мелиоративные мероприятия. В условиях крайне высокой почвенной пестроты выбрана схема отбора

крестом. Отбор образцов проводился в 5-кратной пространственной повторности в октябре 2022 г. на пашне (ЕМ-28), пастбище (ЕМ-35), сенокосе под многолетними травами (ЕМ-21) и залежи (ЕМ-24) с трех глубин (5–10 см, 10–20 см, 30–40 см), что обусловлено мощностью гумусового горизонта в дерново-подзолистых почвах и формированием дернины в поверхностных слоях на залежи, сенокосе и пастбище. Всего было отобрано 60 образцов дерново-подзолистых почв.

Другая группа объектов исследования находилась на территории Биосферного полигона Института Географии РАН (Курская обл.). Почвенный покров представлен черноземами типичными южной лесостепной подзоны. Отбор образцов выполнен в 3-кратной пространственной повторности в конце октября 2022 г. на залежи (VIPK-46, VIPK-47, VIPK-48) и пашне (VIPK-40, VIPK-42, VIPK-44) на глубинах 0–10 см, 20–30 см, 40–50 см, 60–70 см и 80–90 см. Всего было отобрано 30 образцов черноземов.

Площадки на дерново-подзолистых почвах и черноземах были подобраны исходя из схожести рельефа и литологии, чтобы вид угодья можно было считать основным фактором их различий.

Содержание валового органического углерода ( $C_{опр}$ ) оценено с помощью CNHS-анализатора (Leco 932, USA). Повторность анализа каждого образца – 3-кратная.

Биомасса прокариот оценивалась с помощью метода люминесцентной микроскопии с применением флуоресцентного красителя акридина оранжевого (микроскоп “Биомед 5 ПР ЛЮМ” (Россия)) при увеличении 1000 $\times$  с масляной иммерсией (Звягинцев, 1991). Десорбцию клеток с поверхности почвенных частиц проводили при помощи ультразвуковой установки УЗДН-1 (2 мин., сила тока 0.40 А, частота 22 кГц) (Полянская и др., 2017). Расчет числа клеток прокариот на 1 г субстрата производили по формуле:

$$N = S_1 \times a \times n / V \times S_2 \times C,$$

где N-число клеток на 1 г субстрата;  $S_1$  – площадь препарата ( $\text{мкм}^2$ ); а – количество клеток в одном поле зрения (усреднение производится по всем препаратам); n – показатель разведения бактериальной смеси (мл); V – объем капли, наносимой на стекло

(мл);  $S_2$  – площадь поля зрения микроскопа ( $\text{мкм}^2$ ); С – навеска субстрата (г).

Длину актиномицетного мицелия в 1 г образца (NMA) определяли по формуле:

$$\text{NMA} = S_1 \times a \times n / v \times S_2 \times c \times 10^6,$$

где:  $S_1$  – площадь препарата ( $\text{мкм}^2$ ); а – средняя длина фрагментов актиномицетного мицелия в поле зрения ( $\text{мкм}$ );  $n$  – показатель разведения суспензии (мл);  $v$  – объем капли, наносимой на стекло (мл);  $S_2$  – площадь поля зрения микроскопа ( $\text{мкм}^2$ );  $c$  – навеска образца (г).

Биомассу грибов определяли методом люминесцентной микроскопии с применением флуоресцентного красителя калькофлуора белого (КБ) (Звягинцев, 1991; Полянская и др., 2017). Учет спор и длины мицелия осуществляли на люминесцентном микроскопе “Биомед 5 ПР ЛЮМ” (Россия) при увеличении 400×. Десорбцию клеток с почвы проводили при помощи вортекса “MSV-3500” (Латвия) при скорости 3500 об./мин. в течение 10 мин. Расчет грибной биомассы (мг/г почвы) осуществляли, полагая, что плотность спор равна 0.837 г/см<sup>3</sup>, а плотность мицелия – 0.628 г/см<sup>3</sup> (Полянская, Звягинцев, 2005). Содержание грибной биомассы на грамм сухой почвы рассчитывали с учетом ее влажности. Величины микробного пула углерода рассчитывались как сумма биомассы прокариот и грибов. Пространственное и аналитическое варьирование показателей на основе люминесцентной микроскопии в связи с их средним значением даны в приложении к статье (рисунки S10–S22, Приложение).

Статистика и визуализация данных. Оценка влияния типа землепользования в каждом слое почвы на изученные показатели проводилась при помощи критерия Краскела–Уоллиса в программной среде R с помощью функции `kruskal.test` из базового пакета `stats`. Предварительно были оценены нормальность распределений остатков дисперсионного анализа с помощью теста Шапиро–Уилка (функция `shapiro.test` базового пакета `stats`) и равенство дисперсий с помощью теста Левена (функция `leveneTest` из пакета `car`), и, поскольку некоторые изученные почвенные показатели не удовлетворяли условиям применимости более строгих статистиче-

ских тестов (дисперсионного анализа), было решено применить тест Краскела–Уоллиса. Значимость попарных различий между вариантами оценена с помощью теста Данна (функция `testDunn` из пакета R FSA). Уровень значимости для описанных тестов принят равным 0.05. Диаграммы ящиков с усами построены с помощью пакета `ggplot2` (Wickham, 2016) по следующей схеме: центральная линия – среднее значение по выборке, границы ящиков – среднее  $\pm$  стандартная ошибка среднего, усы – минимальное и максимальное значение выборки.

Для оценки взаимосвязей между характеристиками почвенного микробного сообщества на основе данных люминесцентной микроскопии и типами землепользования был применен факторный анализ с использованием пакетов FactoMineR и factoextra (Kassambara, Mundt, 2020; Lê et al., 2008) и анализ связей (анализ графов, relevance networks) с помощью пакета mixOmics (Rohart et al., 2017) в программной среде R. В нашем случае этот метод визуализации основан на анализе PLS-DA и демонстрирует корреляцию переменных (данных люминесцентной микроскопии) с тем или иным типом землепользования.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

**Содержание общего органического углерода ( $C_{опр}$ )** в верхнем слое дерново-подзолистых почв значительно изменялось в зависимости от типа землепользования и снижалось в ряду: сенокос под многолетними травами (2.3%) – залежь (1.9%) – пашня (1.4%) – пастбище (1.1%) (табл. 1). На глубине 10–20 см различия в содержании  $C_{опр}$  между разными типами землепользования сокращались, а на глубине 30–40 см увеличивалось пространственное варьирование содержания  $C_{опр}$  на участках сенокосов и залежей.

Содержание  $C_{опр}$  в черноземе под залежью в верхнем слое было выше по сравнению с изученным черноземом пашни – 5.0% и 3.7% соответственно (табл. 1), что показано в ряде работ (Семенов и др., 2008, 2016; Курганова и др., 2009; Семенов, Когут, 2015; Semenov et al., 2018; Семенов, 2020). Однако уже на глубине 20–30 см значения  $C_{опр}$  в черноземе залежи (3.6%) и пашне (3.4%) статистически не различались. С увеличением глубины различия в со-

держании  $C_{\text{опр}}$  в почве залежи и пашни полностью нивелировались, что согласуется с аналогичными работами по черноземам (Semenov et al., 2018; Булышева и др., 2020).

**Таблица 1.** Содержание  $C_{\text{опр}}$  в почвах ( $n = 5$  для дерново-подзолистых почв;  $n = 3$  для черноземов)

**Table 1.** The content of  $C_{\text{org}}$  in soils ( $n = 5$  for soddy-podzolic soils;  $n = 3$  for chernozems)

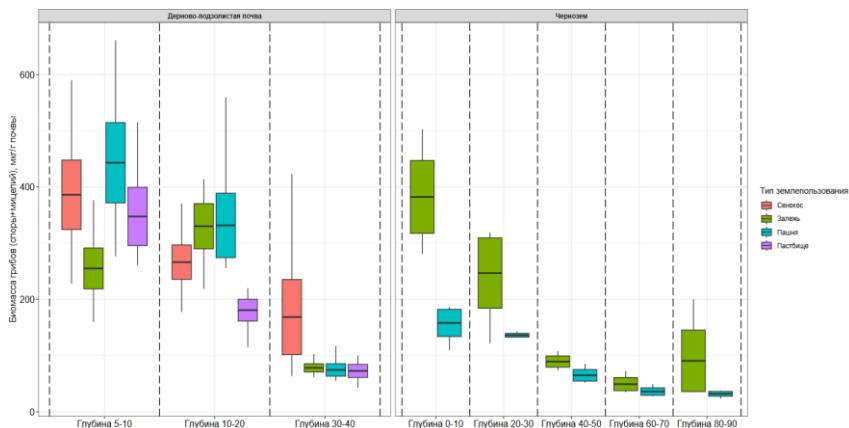
Почва	Тип землепользования	глубина, см	$C_{\text{опр}}, \%$	Ст. откл.
Дерново-подзолистая	Сенокос	5–10	2.32	0.34
		10–20	1.84	0.66
		30–40	0.63	0.33
	Залежь	5–10	1.89	0.42
		10–20	1.55	0.25
		30–40	0.44	0.33
	Пашня	5–10	1.36	0.13
		10–20	1.23	0.10
		30–40	0.17	0.05
	Пастбище	5–10	1.10	0.06
		10–20	0.98	0.07
		30–40	0.21	0.10
Чернозем	Залежь	0–10	5.01	0.71
		20–30	3.59	0.13
		40–50	2.56	0.26
		60–70	1.66	0.25
		80–90	1.26	0.09
	Пашня	0–10	3.65	0.14
		20–30	3.41	0.13
		40–50	2.51	0.04
		60–70	1.66	0.17
		80–90	1.36	0.13

**Общий микробный пул углерода** в поверхностном слое дерново-подзолистых почв составлял от 258 до 456 мкг/г почвы в зависимости от типа землепользования (рис. S1, Приложение). На глубине 10–20 см микробный пул углерода не различался статистически (269–334 мкг/г почвы) под залежью, пашней и сенокосом, но значимо снижался до 184 мкг/г почвы под пастбищем (рис. S1). В слое 30–40 см микробный пул углерода резко уменьшался под залежью, пашней и пастбищем до 76 мкг/г почвы, в то время как под сенокосом этот показатель был в 2 раза выше (170 мкг/г почвы). Это свидетельствует о влиянии типа землепользования на почвенный микробиом и микробный углерод на глубине ниже 30 см, несмотря на то что глубина основной вспашки составляла 22 см, которая проводится (пашня), либо ранее проводилась (сенокос, залежь, пастбище) для каждого исследуемого типа землепользования.

Общий микробный пул углерода в поверхностном слое чернозема достигал 387 мкг/г для почвы залежи и 161 мкг/г для почвы пашни (рис. S1). До глубины 30 см микробный углерод в черноземе залежи был в 1.5–3 раза выше ( $p < 0.05$ ), чем в черноземе под пашней (рис. S1). С глубиной различия между черноземом залежи и пашни выравнивались. Влияние длительной вспашки на микробный углерод подпахотных слоев ранее было отмечено для черноземов Каменной Степи и бурьих полупустынных почв (Semenov et al., 2018).

**Биомасса грибов в составе микробного пула углерода.** В исследованных черноземах и дерново-подзолистых почвах в микробной биомассе полностью преобладали (97–99%) грибы (рис. S2, S3, Приложение), поэтому характер распределения биомассы грибов по глубинам и типам землепользования совпадал с таковым для общего микробного углерода (рис. 1). В дерново-подзолистых почвах отмечалось значительное уменьшение биомассы грибов на глубине 30–40 см для всех типов землепользования. Доля мицелия грибов в дерново-подзолистых почвах была идентична (54–61%) для всех типов землепользования в верхних 10 см (рис. 2). Для слоя 30–40 см наибольшая доля мицелия была выявлена под сенокосом (до 51%), в остальных типах землеполь-

зования составляла лишь 23–34% (рис. 2).

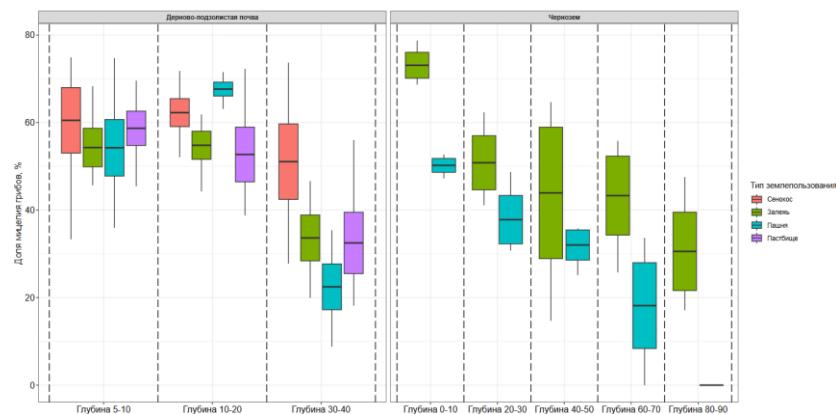


**Рис. 1.** Биомасса грибов (споры + мицелий) в составе микробного пула углерода дерново-подзолистой почвы и чернозема разных типов землепользования на различных глубинах ( $N = 5$  для дерново-подзолистых почв;  $N = 3$  для черноземов).

**Fig. 1.** The total biomass of fungi (spores + mycelium) in the microbial carbon pool of soddy-podzolic soil and chernozem under different land use types at different depths ( $N = 5$  for soddy-podzolic soils;  $N = 3$  for chernozems).

Доля мицелия в грибной биомассе в поверхностном слое черноземов залежи составляла 73%, пашни – 50% (рис. 2). Для слоя 20–30 см доля мицелия в черноземе под залежью составляла 52%, под пашней – 38%. В слое 80–90 см доля мицелия в черноземе залежи составляла лишь 31%, а в черноземе под пашней мицелий не был выявлен.

Длина мицелия грибов в дерново-подзолистой почве уменьшалась с глубиной от сотен м/г почвы к десяткам м/г почвы (рис. 3). В поверхностном слое длина мицелия в почве залежи, пашни и пастбища составляла 96–131 м/г почвы, сенокоса – 206 м/г. В слое 30–40 см протяженность гиф микобиоты в почве залежи, пашни и пастбища составляла 21–27 м/г почвы, в то время как сенокоса – 104 м/г почвы.



**Рис. 2.** Доля мицелия грибов в общей грибной биомассе дерново-подзолистой почвы и чернозема разных типов землепользования на различных глубинах ( $N = 5$  для дерново-подзолистых почв;  $N = 3$  для черноземов).

**Fig. 2.** Proportion of fungal mycelium in the total fungal biomass of soddy-podzolic soil and chernozem under different land use types at different depths ( $N = 5$  for soddy-podzolic soils;  $N = 3$  for chernozems).

Длина мицелия грибов в поверхностном слое чернозема залежи составляла 223 м/г почвы, пашни – 63 м/г почвы ( $p < 0.05$ ). С увеличением глубины величина данного показателя сокращалась. В слое 20–30 см в почве залежи длина мицелия снижалась почти в 2 раза (130 м/г почвы), в то время как под пашней почвы не менялась (52 м/г почвы). Более глубокие слои чернозема залежи также характеризовались большими значениями длины мицелия грибов по сравнению с черноземом пашни (рис. 3).

Дерново-подзолистые почвы содержали  $10^4$ – $10^5$  спор/г почвы (рис. S4, Приложение). Основная часть пропагул микробиоты была представлена экземплярами мелких размеров в 2–3 мкм. Крупные пропагулы (5 мкм и более) были выявлены только в поверхностном слое дерново-подзолистой почвы залежи и сенокоса, составляя порядка  $10^3$  клеток/г почвы.

Образцы черноземов содержали  $10^3$ – $10^4$  одноклеточных грибных пропагул (спор и дрожжей) на г почвы (рис. 4S). Большая

часть пропагулы микобиоты была представлена мелкими формами (2–3 мкм), доля которых была больше в почве под пашней (до 89%) по сравнению с залежью (до 76%). Крупные пропагулы (5 мкм и более) были выявлены только в почве залежи, численность которых составляла около  $10^2$  клеток/г почвы.



**Рис. 3.** Длина мицелия грибов в дерново-подзолистой почве и черноземе разных типов землепользования на различных глубинах ( $N = 5$  для дерново-подзолистых почв;  $N = 3$  для черноземов).

**Fig. 3.** The length of fungal mycelium in soddy-podzolic soil and chernozem under different land use types at different depths ( $N = 5$  for soddy-podzolic soils;  $N = 3$  for chernozems).

**Биомасса прокариот в составе микробного пула углерода** в верхнем слое дерново-подзолистой почвы была идентична (2.5 мкг/г почвы) под сенокосом, залежью и пашней, но значительно повышалась (до 4 мкг/г) под пастбищем ( $p < 0.05$ ) (рис. 4). С глубиной тенденция к повышению величин биомассы прокариот в почве пастбища сохранялась. Биомасса прокариот в черноземе залежи была значительно выше по сравнению с почвой пашни для всех рассмотренных глубин ( $p < 0.05$ ) (рис. 4). Протяженность мицелия актиномицетов в проанализированных черноземах и дерново-подзолистых почвах составляла несколько десятков метров на г почвы (рис. S5, Приложение).



**Рис. 4.** Общая биомасса прокариот (одноклеточные формы + мицелий) в составе микробного пула углерода дерново-подзолистой почвы и чернозема разных типов землепользования на различных глубинах ( $N = 5$  для дерново-подзолистых почв;  $N = 3$  для черноземов).

**Fig. 4.** The total prokaryotic biomass (unicellular organisms + mycelium) in the microbial carbon pool of soddy-podzolic soil and chernozem under different land use types at different depths ( $N = 5$  for soddy-podzolic soils;  $N = 3$  for chernozems).

По порядку значений биомасса прокариот в изученных черноземах и дерново-подзолистых почвах соответствует таковым для черноземов Башкортостана и дерново-подзолистых почв средней полосы России (Полянская и др., 2012, 2017; Никитин и др., 2019), а также серо-гумусовым глеевым почвам Костромской области (Полянская и др., 2020). Однако это на порядок выше по сравнению со значениями для черноземов Алтайского края и Челябинской области (Полянская и др., 2016) и ниже, чем для обыкновенных черноземов Каменной степи (Манучарова и др., 2005).

Доля прокариот в общем микробном пуле углерода составила 1–3%. Полученные величины полностью соответствуют тем, которые получаются в почвах при использовании метода люминесцентной микроскопии (Полянская и др., 2005; 2012; Ананьева и др., 2008). Тем не менее сравнение структуры микробной биомассы, полученной методами люминесцентной микроскопии и инги-

бирования антибиотиками субстрат-индуцированного дыхания, показало, что используемые методы дают принципиально разные значения вклада бактерий в общую микробную биомассу (1–3% по микроскопии и 26–48% по ингибираванию дыхания соответственно) (Полянская и др., 2017). Использование метода каскадной фильтрации показывает, что люминесцентная микроскопия может значительно недоучитывать количество бактериальных клеток и спор, и, как следствие, численность, биомассу и долю прокариот из-за неучтенных мелких форм бактериальных клеток (Полянская и др. 2017; 2020). Другой возможной причиной низких значений биомассы прокариот может служить коэффициент пересчета численности бактериальных клеток в углерод микробной биомассы, который основан на среднем объеме, плотности и диаметре бактериальной клетки. Таким образом, хотя люминесцентная микроскопия может быть использована для определения общего микробного углерода, определяемые величины прокариотной биомассы и отношения грибы/бактерии сильно недоучиваются этим методом при существующем порядке их учета.

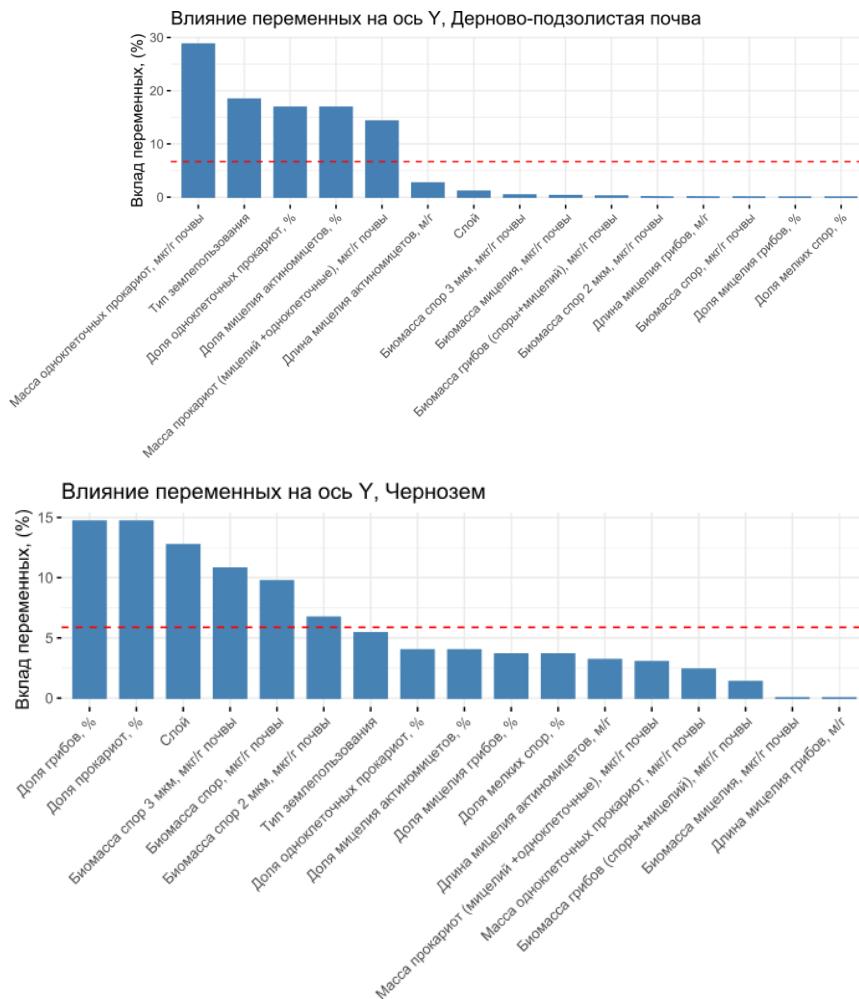
**Связь типов землепользования с микробными показателями на основе люминесцентной микроскопии.** Чтобы оценить влияние типа землепользования на состояние микробного пул углерода на основе данных люминесцентной микроскопии, для полученных переменных был проведен факторный анализ (рис. 6; рис. S6, S7, S8, Приложение).

В случае дерново-подзолистой почвы первая и вторая компоненты факторного анализа в сумме объясняли 51% вариации данных (рис. S6). Вдоль компоненты 1, которая объясняет 33.5% вариации переменных, разделились точки, связанные с глубиной отбора проб, а вдоль компоненты 2, объясняющей 17.6% вариации, разделились точки, связанные с рассматриваемыми типами землепользования (рис. S6). Таким образом, согласно результатам факторного анализа, в случае дерново-подзолистой почвы на измеренные показатели микробного пул углерода, полученные методом люминесцентной микроскопии, существенно большее влияние оказывает глубина отбора проб, нежели тип землепользования.

Тем не менее можно выделить показатели, изменение которых было связано со сменой типа землепользования. Наибольшее влияние на компоненту 2 (ось Y), по которой идет разделение точек по типам землепользования, оказывают биомасса одноклеточных прокариот, доля одноклеточных прокариот, доля мицелия актиномицетов и суммарная масса прокариот (рис. 5). Данные микробиологические показатели достигали максимальных значений в почве пастбища (рис. 4; рис. S2, S5). Для других типов землепользования (сенокос, залежь, пашня), которые не образовывали выраженных скоплений точек (рис. S6), связанные с ними параметры люминесцентной микроскопии по результатам факторного анализа не были выявлены. Таким образом, биомасса и доля прокариот, а также длина мицелия были основными показателями структуры микробного пула углерода, связанными с изменением типа землепользования для обоих типов почв.

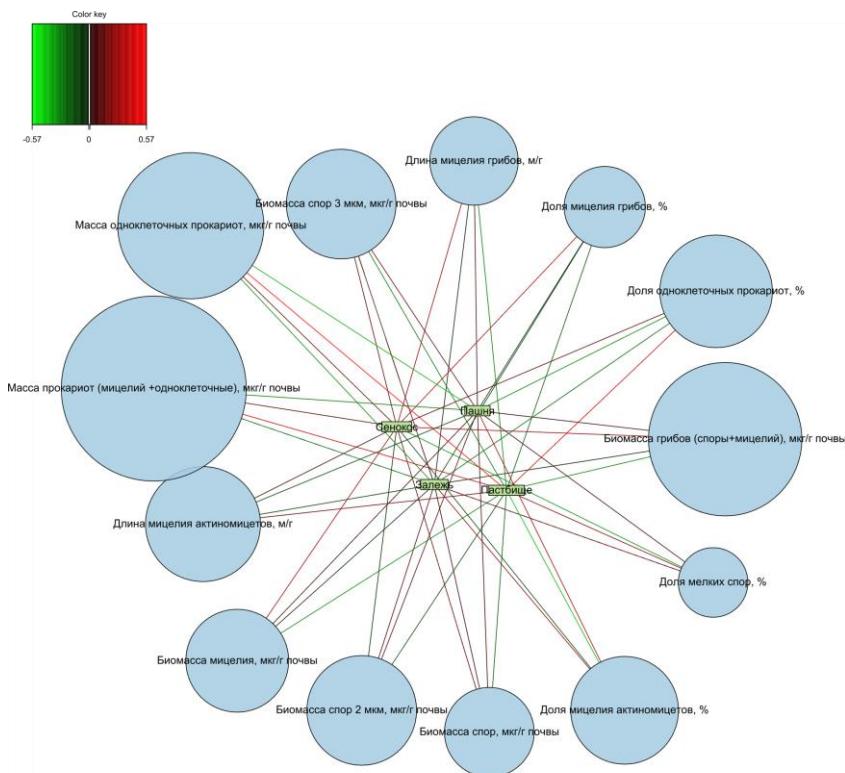
По результатам анализа PLS-DA с визуализацией relevance network были отмечены корреляции некоторых других параметров с типами землепользования (рис. 6). Влияние сенокоса выражалось в увеличении доли мицелия грибов и биомассы мицелия, а также уменьшении доли мелких спор (рис. 6). Для почвы залежи было отмечено уменьшение массы одноклеточных прокариот, суммарной массы прокариот и увеличение доли мицелия актиномицетов. В почве пашни уменьшалась биомасса одноклеточных прокариот и доля одноклеточных прокариот. Однако, как правило, эти закономерности носили спорадический характер (отмечены только в отдельных слоях) и были слабо выражены (имеют низкий уровень корреляции) из-за сильной дисперсии переменных.

Результаты факторного анализа для чернозема согласуются с результатами анализа PLS-DA с визуализацией relevance network (рис. 5, 6, 7). Помимо выделенных выше микробиологических показателей на основе люминесцентной микроскопии, изменение которых было ассоциировано с разными типами землепользования, ряд показателей почти не изменялся в черноземе разного землепользования: доля грибов, доля прокариот, биомасса спор, биомасса спор размером 3 мкм, биомасса спор размером 2 мкм (рис. 7).



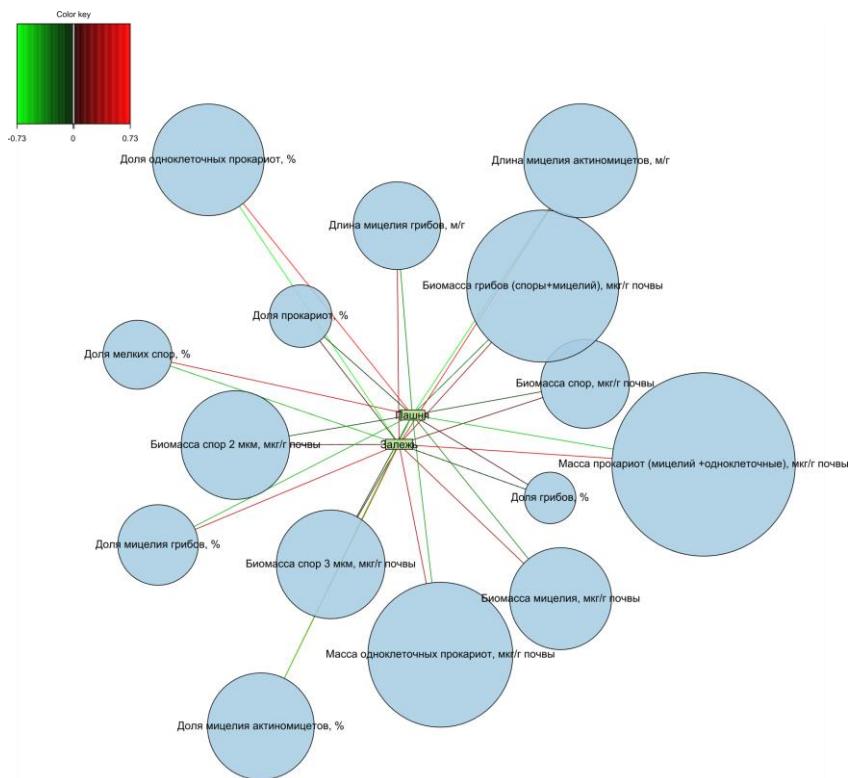
**Рис. 5.** Вклад показателей люминесцентной микроскопии в выявление различий между исследуемыми черноземами и дерново-подзолистыми почвами на основе факторного анализа.

**Fig. 5.** The contribution of luminescent microscopy indicators to the revealing of differences between the studied chernozems and soddy-podzolic soils based on factor analysis.



**Рис. 6.** График связей на основе PLS-DA, демонстрирующий корреляции между параметрами люминесцентной микроскопии и типом землепользования для дерново-подзолистой почвы. Узлы представляют собой переменные, а цвет линий обозначает направление корреляции: красный цвет указывает на положительную связь с типом землепользования, зеленый – на отрицательную связь. Яркость цвета означает силу связи.

**Fig. 6.** A PLS-DA-based linkage plot illustrates the relationship between fluorescence microscopy parameters and land use type for soddy-podzolic soil. Nodes represent variables, and line colors indicate the correlation direction: red for a positive relationship with land use type and green for a negative one. The brightness of the color reflects the strength of the relationship.



**Рис. 7.** График связей на основе PLS-DA, демонстрирующий корреляции между параметрами люминесцентной микроскопии и типом землепользования для чернозема. Узлы представляют собой переменные, а цвет линий обозначает направление корреляции: красный цвет указывает на положительную связь с типом землепользования, зеленый – на отрицательную связь. Яркость цвета означает силу связи.

**Fig. 7.** A PLS-DA-based linkage plot illustrates the relationship between fluorescence microscopy parameters and land use type for chernozem. Nodes represent variables, and line colors indicate the correlation direction: red for a positive relationship with land use type and green for a negative one. The brightness of the color reflects the strength of the relationship.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование метода люминесцентной микроскопии позволило выявить значительное влияние землепользования на размеры и соотношения различных компонентов в составе микробного пула углерода в черноземе. Большинство показателей структуры микробной биомассы (численность грибов, длина мицелия грибов и актиномицетов, биомасса прокариот) были выше в черноземе залежи, по сравнению с пашней, при этом различия проявлялись для более глубинных слоев 60–70 и 80–90 см. Несмотря на различия в содержании общего органического углерода, дерново-подзолистая почва разных типов сельскохозяйственного использования не отличалась по большей части микробиологических показателей, диагностируемых методом люминесцентной микроскопии.

Факторный анализ показал, что биомасса и доля прокариот, а также длина мицелия являются показателями структуры микробного пула углерода, определяемыми методом люминесцентной микроскопии, которые были ассоциированы с разными типами землепользования для обоих типов почв. Выявленные крайне высокие значения соотношений грибы/бактерии, по-видимому, обусловлены недооценкой биомассы бактериальных клеток используемым методом. Тем не менее полученные результаты демонстрируют, что люминесцентная микроскопия может быть использована в качестве дополнительного подхода к более точным методам оценки микробного пула углерода и позволяет определить влияние различных типов сельскохозяйственного землепользования на размеры и структуру микробной биомассы в почвах.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ананьева Н.Д., Полянская Л.М., Стольникова Е.В., Звягинцев Д.Г. Соотношение биомассы грибов и бактерий в профиле лесных почв // Известия Российской академии наук. Серия биологическая. 2010. № 3. С. 308–317.
2. Благодатская Е.В., Семенов М.В., Якушев А.В. Активность и биомасса почвенных микроорганизмов в изменяющихся условиях окружающей среды. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2016.
3. Булышева А.М., Хохлова О.С., Бакунович Н.О., Русаков А.В.,

Мякишина Т.Н., Рюмин А.Г. Изменение карбонатного состояния черноземов Приазовья при переходе их из пашни в залежь // Почвоведение. 2020. № 8. С. 1025–1038. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0032180X2008002X>.

4. 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. Роль микроорганизмов в экологических функциях почв // Почвоведение. 2015. № 9. С. 1087–1087. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0032180X15090038>.

5. Звягинцев Д.Г. Методы почвенной микробиологии и биохимии. М.: Изд-во МГУ, 1991. 304 с.

6. Курганова И.Н., Ермолаев А.М., Кузяков Я.В. Изменение пулов органического углерода при самовосстановлении пахотных черноземов // Агрохимия. 2009. № 5. С. 5–12.

7. Лебедева Т.Н., Соколов Д.А., Семенов М.В., Зинякова Н.Б., Удальцов С.Н., Семенов В.М. Распределение органического углерода между структурными и процессными пулами в серой лесной почве разного землепользования // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2024. Вып. 118. С. 79–127. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2024-118-79-127>.

8. Манучарова Н.А., Белова Э.В., Воробьев А.В., Полянская Л.М., Степанов А.Л. Сукцессия хитинолитических микроорганизмов в черноземе // Микробиология. 2005. № 5. С. 693–698.

9. Никитин Д.А., Чернов Т.И., Тхакахова А.К., Семенов М.В., Бгажба Н.А., Железова А.Д., Марфенина О.Е., Кутовая О.В. Влияние низких температур на структуру микробной биомассы в почвенных образцах при их хранении // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2017. Вып. 89. С. 36–53. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2017-89-36-53>.

10. Никитин Д.А., Чернов Т.И., Железова А.Д., Тхакахова А.К., Никитина С.А., Семенов М.В., Ксенофонтова Н.А., Кутовая О.В. Сезонная динамика биомассы микроорганизмов в дерново-подзолистой почве // Почвоведение. 2019. № 11. С. 1356–1364. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0032180X19110078>.

11. Никитин Д.А., Семенов М.В., Чернов Т.И., Ксенофонтова Н.А., Железова А.Д., Иванова Е.А., Хитров Н.Б., Степанов А.Л. Микробиологические индикаторы экологических функций почв (обзор) // Почвоведение. 2022. № 2. С. 228–243. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0032180X22020095>.

12. Никитин Д.А., Семенов М.В., Ксенофонтова Н.А., Тхакахова А.К., Русакова И.В., Лукин С.М. Влияние внесения соломы на состояние

- микробиома дерново-подзолистой почвы // Почвоведение. 2023. № 5. С. 640–653. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0032180X22601189>.
13. Полянская Л.М., Звягинцев Д.Г. Содержание и структура микробной биомассы как показатели экологического состояния почв // Почвоведение. 2005. № 6. С. 706–714.
14. Полянская Л.М., Суханова Н.И., Чакмазян К.В., Звягинцев Д.Г. Особенности изменения структуры микробной биомассы почв в условиях залежи // Почвоведение. 2012. № 7. С. 792–792.
15. Полянская Л.М., Пинчук И.П., Степанов А.Л. Сравнительный анализ методов люминесцентной микроскопии и каскадной фильтрации для оценки численности и биомассы бактерий в почве: роль разведения почвенной суспензии // Почвоведение. 2017. № 10. С. 1216–1219. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0032180X16100117>.
16. Полянская Л.М., Юмаков Д.Д., Тюгай З.Н., Степанов А.Л. Соотношение грибов и бактерий в темногумусовой лесной почве // Почвоведение. 2020. № 9. С. 1094–1099. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0032180X20090129>.
17. Семенов В.М., Иванникова Л.А., Кузнецова Т.В., Семенова Н.А., Тулина А.С. Минерализуемость органического вещества и углерод-секвестрирующая емкость почв зонального ряда // Почвоведение. 2008. № 7. С. 819–832.
18. Семенов М.В., Стольникова Е.В., Ананьева Н.Д., Иващенко К.В. Структура микробного сообщества почвы катены правобережья р. Оки // Изв. РАН. Сер. Биол. 2013. № 3. С. 299–308.
19. Семенов В.М., Когут Б.М. Почвенное органическое вещество. М.: ГЕОС, 2015. 233 с.
20. Семенов М.В., Манучарова Н.А., Степанов А.Л. Распределение метаболически активных представителей прокариот (архей и бактерий) по профилям чернозема и бурой полупустынной почвы // Почвоведение. 2016. № 2. С. 239–248. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0032180X16020106>.
21. Семенов В.М., Когут Б.М., Зинякова Н.Б., Масютенко Н.П., Маликова Л.С., Лебедева Т.Н., Тулина А.С. Биологически активное органическое вещество в почвах европейской части России // Почвоведение. 2018. № 4. С. 457–472. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0032180X1804007X>.
22. Семенов М.В., Манучарова Н.А., Краснов Г.С., Никитин Д.А., Степанов А.Л. Биомасса и таксономическая структура микробных сообществ в почвах правобережья р. Оки // Почвоведение. 2019. № 8. С. 974–985. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0032180X19080124>.
23. Семенов В.М. Функции углерода в минерализационно-иммобилизационном обороте азота в почве // Агрохимия. 2020. № 6. С.

- 78–96. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002188120060101>.
24. Семенов М.В., Ксенофонтова Н.А., Никитин Д.А., Тхакахова А.К., Лукин С.М. Микробиологические показатели дерново-подзолистой почвы и ее ризосфера в полувековом полевом опыте с применением разных систем удобрения // Почвоведение. 2023. № 6. С. 715–729. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0032180X22601220>.
25. Сущко С.В., Ананьева Н.Д., Иващенко К.В., Кудеяров В.Н. Эмиссия CO<sub>2</sub>, микробная биомасса и базальное дыхание чернозема при различном землепользовании // Почвоведение. 2019. № 9. С. 1081–1091. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0032180X19090090>.
26. Angst G., Mueller K.E., Nierop K.G., Simpson M.J. 2021. Plant-or microbial-derived? A review on the molecular composition of stabilized soil organic matter // Soil Biology and Biochemistry. Vol. 156. P. 108189. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108189>.
27. Finlay R.D., Thorn R.G. The fungi in soil. Modern Soil Microbiology, Third Edition. 2019. P. 65–90.
28. Kassambara A., Mundt F. Factoextra: extract and visualize the results of multivariate data analyses. 2020. URL: <https://CRAN.Rproject.org/package=factoextra>.
29. Kramer C., Gleixner G. Soil organic matter in soil depth profiles: distinct carbon preferences of microbial groups during carbon transformation // Soil Biology and Biochemistry. 2008. Vol. 40 (2). P. 425–433. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2007.09.016>.
30. Lê S., Josse J., Husson F. FactoMineR: an R package for multivariate analysis // Journal of statistical software. 2008. Vol. 25. P. 1–18.
31. Liang C., Amelung W., Lehmann J., Kästner M. Quantitative assessment of microbial necromass contribution to soil organic matter // Global Change Biology. 2019. Vol. 25. P. 3578–3590. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.14781>.
32. Rohart F., Gautier B., Singh A., Lê Cao K.A. mixOmics: An R package for ‘omics feature selection and multiple data integration // PLoS computational biology. 2017. Vol. 13 (11). P. e1005752.
33. Semenov M.V., Chernov T.I., Tkhakakhova A.K., Zhelezova A.D., Ivanova E.A., Kolganova T.V., Kutovaya O.V. Distribution of prokaryotic communities throughout the Chernozem profiles under different land uses for over a century // Applied Soil Ecology. 2018. Vol. 127. P. 8–18. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2018.03.002>.
34. Wang B., An S., Liang C., Liu Y., Kuzyakov Y. Microbial necromass as the source of soil organic carbon in global ecosystems // Soil Biology and Biochemistry. 2021. Vol. 162. P. 108422. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108422>

35. Wickham H. ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis. New York: Springer-Verlag, 2016.

## REFERENCES

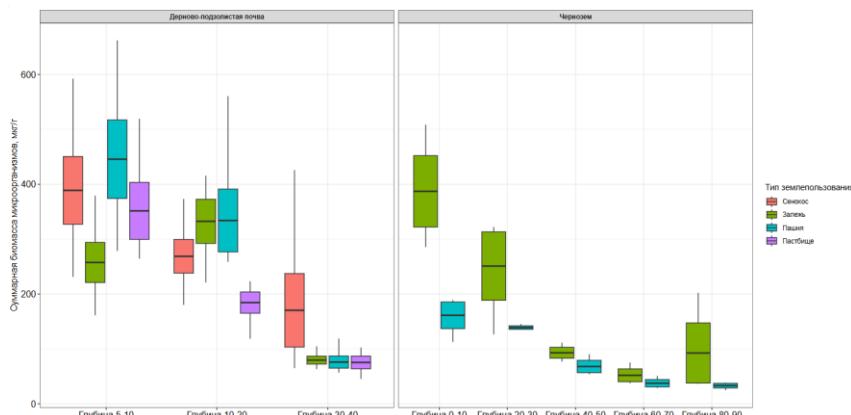
1. Ananyeva N.D., Polyanskaya L.M., Stolnikova E.V., Zvyagintzev D.G., Fungal to bacterial biomass ratio in the forests soil profile, *Biology bulletin*, 2010, Vol. 37, pp. 254–262, DOI: <https://doi.org/10.1134/S1062359010030064>.
2. Blagodatskaya E.V., Semenov M.V., Yakushev A.V., Activity and biomass of soil microorganisms in changing environmental conditions, Moscow: T-vo nauch. izd. KMK, 2016.
3. Bulysheva A.M., Khokhlova O.S., Bakunovich N.O., Rusakov, V.A., Myakshina T.N., Ryumin A.G., Changes in the carbonate status of chernozems of Azov region upon their conversion from cropland to long-term fallow, *Eurasian Soil Science*, 2020, Vol. 53, pp. 1182–1194, DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229320080025>.
4. Dobrovolskaya T.G., Zvyagintsev D.G., Chernov I.Y., Golovchenko A.V., Zenova G.M., Lysak L.V., Manucharova N.A., Marfenina O.E., Polyanayeva L.M., Stepanov A.L., Umarov M.M., The role of microorganisms in the ecological functions of soils, *Eurasian soil science*, 2015, Vol. 48, pp. 959–967, DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229315090033>.
5. Zvyagintsev D.G., *Methods of Soil Microbiology and Biochemistry*, Moscow: Izd-vo MGU, 1991, 304 p.
6. Kurganova I.N., Yermolayev A.M., Kuzyakov Ya.V., Izmeneniye pulov organicheskogo ugleroda pri samovosstanovlenii pakhotnykh chernozemov (Changes in organic carbon pools during self-restoration of arable chernozems), *Agrokhimiya*, 2009, No. 5, pp. 5–12.
7. Lebedeva T.N., Sokolov D.A., Semenov M.V., Zinyakova N.B., Udal'tsov S.N., Semenov V.M., Organic carbon distribution between structural and process pools in the gray forest soil of different land use, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2024, Vol. 118, pp. 79–127, DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2024-118-79-127>.
8. Manucharova N.A., Belova E.V., Vorob'ev A.V., Polyanskaya L.M., Stepanov A.L., Succession of chitinolytic microorganisms in Chernozem soil, *Microbiology*, 2005, Vol. 74, pp. 602–607, DOI: <https://doi.org/10.1007/s11021-005-0109-5>.
9. Nikitin D.A., Chernov T.I., Tkachukhova A.K., Semenov M.V., Bagazhba N.A., Zhelezova A.D., Marfenina O.E., Kutovaya O.V., The impact of low temperatures on the structure of the microbial biomass during the soil

- samples storage, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2017, Vol. 89, pp. 36–53, DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2017-89-36-53>.
10. Nikitin D.A., Chernov T.V., Zhelezova A.D., Tkakakhova A.K., Nikitina S.A., Semenov M.V., Xenofontova N.A., Kutovaya O.V., Seasonal dynamics of microbial biomass in soddy-podzolic soil, *Eurasian Soil Science*, 2019, Vol. 52, pp. 1414–1421, DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229319110073>.
11. Nikitin D.A., Semenov M.V., Chernov T.I., Ksenofontova N.A., Zhelezova A.D., Ivanova E.A., Khitrov N.B., Stepanov A.L., Microbiological indicators of soil ecological functions: a review, *Eurasian Soil Science*, 2022, Vol. 55 (2), pp. 221–234, DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229322020090>.
12. Nikitin D.A., Semenov M.V., Ksenofontova N.A., Tkakakhova A.K., Rusakova I.V., Lukin S.M., The influence of straw application on the state of the microbiome of soddy-podzolic soil, *Eurasian Soil Science*, 2023, Vol. 5, pp. 640–653, DOI: <https://doi.org/10.31857/S0032180X22601189>.
13. Polyanskaya L.M., Zvyagintsev D.G., The content and composition of microbial biomass as an index of the ecological status of soil, *Eurasian Soil Science*, 2005, Vol. 38 (6), pp. 625–633.
14. Polyanskaya L.M., Sukhanova N.I., Chakmazyan K.V., Zvyagintsev D.G., Changes in the structure of soil microbial biomass under fallow, *Eurasian Soil Science*, 2012, Vol. 45, pp. 710–716, DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229312030088>.
15. Polyanskaya L.M., Pinchuk I.P., Stepanov A.L., Comparative analysis of the luminescence microscopy and cascade filtration methods for estimating bacterial abundance and biomass in the soil: Role of soil suspension dilution, *Eurasian Soil Science*, 2017, Vol. 50, pp. 1173–1176, DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229317100088>.
16. Polyanskaya L.M., Yumakov D.D., Tyugay Z.N., Stepanov A.L., Fungi and bacteria in the dark-humus forest soil, *Eurasian Soil Science*, 2020, Vol. 53, pp. 1255–1259, DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229320090124>.
17. Semenov V.M., Ivannikova L.A., Kuznetsova T.V., Semenova N.A., Tulina A.S., The mineralizability of organic matter and the carbon-sequestering capacity of soils of the zonal series, *Eurasian Soil Science*, 2008, Vol. 7, pp. 819–832.
18. Semenov M.V., Stolnikova E.V., Ananyeva N.D., Ivashchenko K.V., Structure of the microbial community in soil catena of the right bank of the Oka River, *Biology Bulletin*, 2013, Vol. 40, pp. 266–274, DOI: <https://doi.org/10.1134/S1062359013030084>.
19. Semenov V.M., Kogut B.M., *Pochvennoe organicheskoe veshchestvo* (Soil organic matter), Moscow: GEOS, 2015, 233 p.
20. Semenov M.V., Manucharova N.A., Stepanov A.L., Distribution of metabolically active prokaryotes (Archaea and Bacteria) throughout the profiles of

- chernozem and brown semidesert soil, *Eurasian Soil Science*, 2016, Vol. 49, pp. 217–225, DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229316020101>.
21. Semenov V.M., Kogut B.M., Zinyakova N.B., Masyutenko N.P., Mal'yukova L.S., Lebedeva T.N., Tulina A.S., Biologically active organic matter in soils of European Russia, *Eurasian soil science*, 2018, Vol. 51, pp. 434–447, DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229318040117>.
22. Semenov M.V., Manucharova N.A., Krasnov G.S., Nikitin D.A., Stepanov A.L., Biomass and taxonomic structure of microbial communities in soils of the right-bank basin of the Oka River, *Eurasian Soil Science*, 2019, Vol. 52, pp. 971–981, DOI: <https://doi.org/10.1134/S106422931908012X>.
23. Semenov V.M., Functions of carbon in the mineralization–immobilization turnover of nitrogen in soil, *Agrokhimiya*, 2020, Vol. 3, pp. 78–96.
24. Semenov M.V., Ksenofontova N.A., Nikitin D.A., Tkachakhova A.K., Lukin S.M., Microbiological parameters of soddy-podzolic soil and its rhizosphere in half a century of field experiment using different fertilizer systems, *Eurasian soil science*, 2023, Vol. 6, pp. 715–729, DOI: <https://doi.org/10.31857/S0032180X22601220>.
25. Sushko S.V., Ananyeva N.D., Ivashchenko K.V., Kudeyarov V.N., Soil CO<sub>2</sub> emission, microbial biomass, and basal respiration of chernozems under different land uses, *Eurasian Soil Science*, 2019, Vol. 52, pp. 1091–1100, DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229319090096>.
26. Angst G., Mueller K.E., Nierop K.G., Simpson M.J., Plant-or microbial-derived? A review on the molecular composition of stabilized soil organic matter, *Soil Biology and Biochemistry*, 2021, Vol. 156, pp. 108189, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108189>.
27. Finlay R.D., Thorn R.G., *The fungi in soil. Modern Soil Microbiology*, Third Edition, 2019, pp. 65–90.
28. Kassambara A., Mundt F., Factoextra: extract and visualize the results of multivariate data analyses, 2020, URL: <https://CRAN.R-project.org/package=factoextra>.
29. Kramer C., Gleixner G., Soil organic matter in soil depth profiles: distinct carbon preferences of microbial groups during carbon transformation, *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, Vol. 40 (2), pp. 425–433, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2007.09.016>.
30. Lê S., Josse J., Husson F., FactoMineR: an R package for multivariate analysis, *Journal of statistical software*, 2008, Vol. 25, pp. 1–18.
31. Liang C., Amelung W., Lehmann J., Kästner M., Quantitative assessment of microbial necromass contribution to soil organic matter, *Global Change Biology*, 2019, Vol. 25, pp. 3578–3590, DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.14781>.

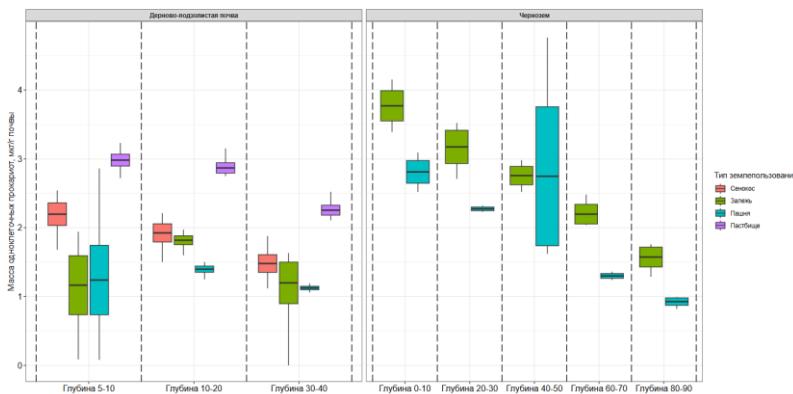
32. Rohart F., Gautier B., Singh A., Lê Cao K.A., mixOmics: An R package for ‘omics feature selection and multiple data integration, *PLoS computational biology*, 2017, Vol. 13 (11), pp. e1005752.
33. Semenov M.V., Chernov T.I., Tkakakhova A.K., Zhelezova A.D., Ivanova E.A., Kolganova T.V., Kutovaya O.V., Distribution of prokaryotic communities throughout the Chernozem profiles under different land uses for over a century, *Applied Soil Ecology*, 2018, Vol. 127, pp. 8–18, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2018.03.002>.
34. Wang B., An S., Liang C., Liu Y., Kuzyakov Y., Microbial necromass as the source of soil organic carbon in global ecosystems, *Soil Biology and Biochemistry*, 2021, Vol. 162, pp. 108422, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108422>.
35. Wickham H., *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. New York: Springer-Verlag, 2016.

## ПРИЛОЖЕНИЕ



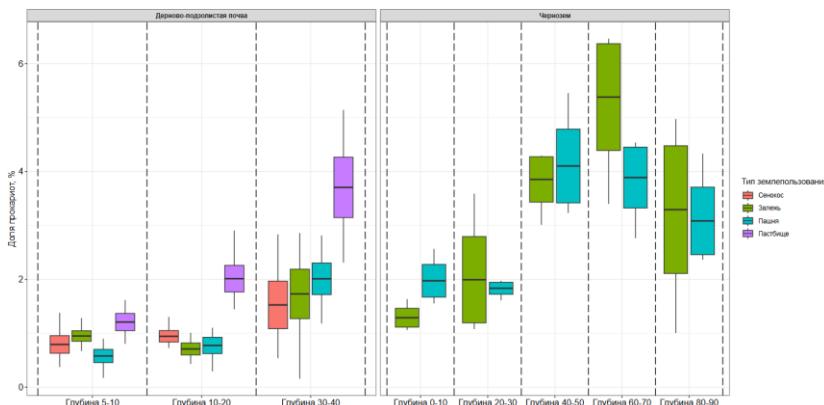
**Рис. S1.** Общий микробный пул углерода (прокариоты+грибы) в дерново-подзолистой почве и черноземе разных типов землепользования на различных глубинах (N = 5 для дерново-подзолистых почв; N = 3 для черноземов).

**Fig. S1.** The total microbial biomass carbon (prokaryotes + fungi) in soddy-podzolic soil and chernozem under different land use types at different depths (N = 5 for soddy-podzolic soils; N = 3 for chernozems).



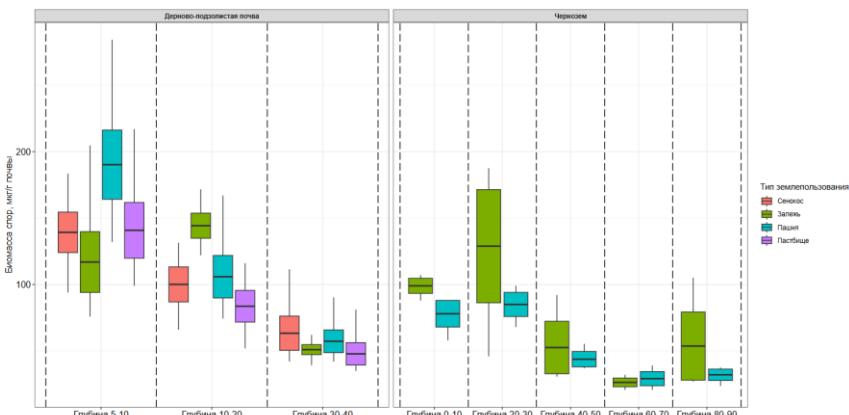
**Рис. S2.** Биомасса одноклеточных прокариот в дерново-подзолистой почве и черноземе разных типов землепользования на различных глубинах ( $N = 5$  для дерново-подзолистых почв;  $N = 3$  для черноземов).

**Fig. S2.** The biomass of unicellular prokaryotes in soddy-podzolic soil and chernozem under different land use types at different depths ( $N = 5$  for soddy-podzolic soils;  $N = 3$  for chernozems).



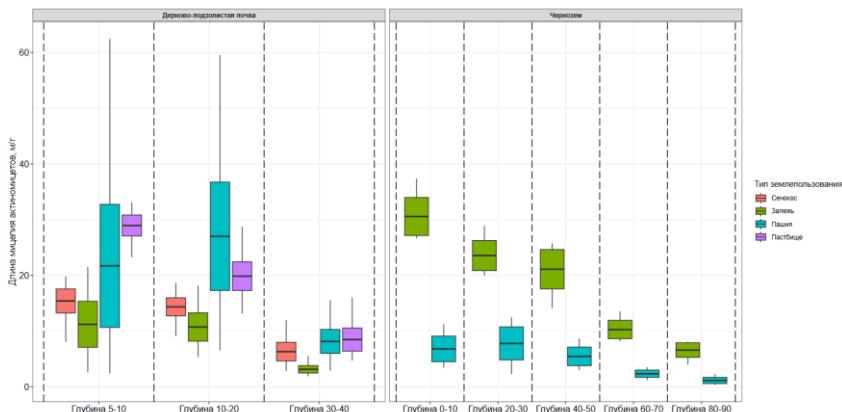
**Рис. S3.** Доля прокариот в общей микробной биомассе в дерново-подзолистой почве и черноземе разных типов землепользования на различных глубинах ( $N = 5$  для дерново-подзолистых почв;  $N = 3$  для черноземов).

**Fig. S3.** Proportion of prokaryotic biomass in total microbial biomass in soddy-podzolic soil and chernozem under different land use types at different depths ( $N = 5$  for soddy-podzolic soils;  $N = 3$  for chernozems).



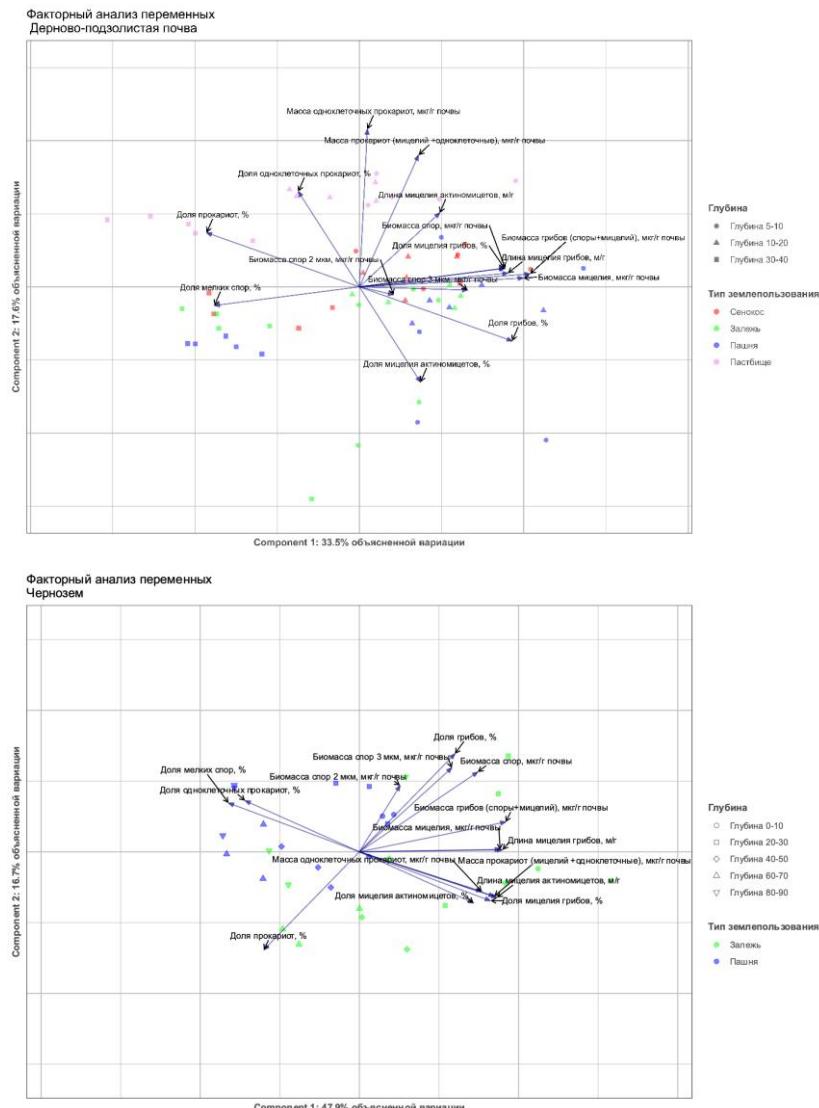
**Рис. S4.** Биомасса спор грибов в дерново-подзолистой почве и черноземе разных типов землепользования на различных глубинах ( $N = 5$  для дерново-подзолистых почв;  $N = 3$  для черноземов).

**Fig. S4.** The biomass of fungal spores in soddy-podzolic soil and chernozem under different land use types at different depths ( $N = 5$  for soddy-podzolic soils;  $N = 3$  for chernozems).



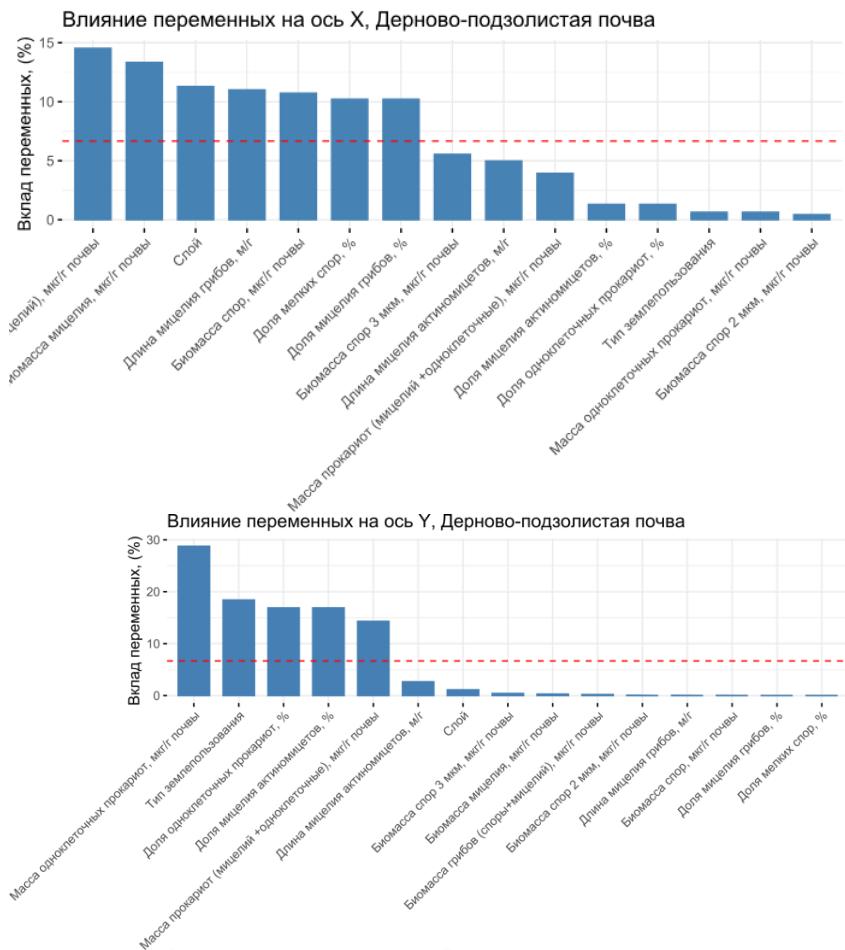
**Рис. S5.** Длина мицелия актиномицетов в дерново-подзолистой почве и черноземе разных типов землепользования на различных глубинах ( $N = 5$  для дерново-подзолистых почв;  $N = 3$  для черноземов).

**Fig. S5.** The length of actinomycete mycelium in soddy-podzolic soil and chernozem under different land use types at different depths ( $N = 5$  for soddy-podzolic soils;  $N = 3$  for chernozems).



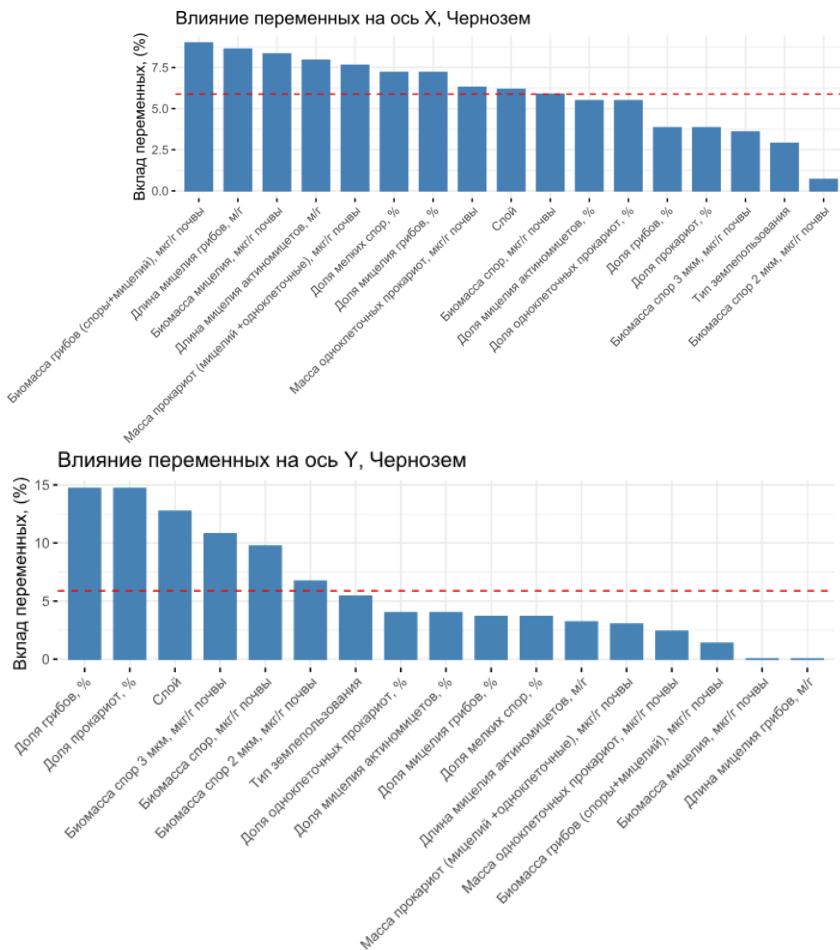
**Рис. S6.** Факторный анализ показателей люминесцентной микроскопии для дерново-подзолистой почвы и чернозема.

**Fig. S6.** Factor analysis of luminescent microscopy indicators for soddy-podzolic soil and chernozem.



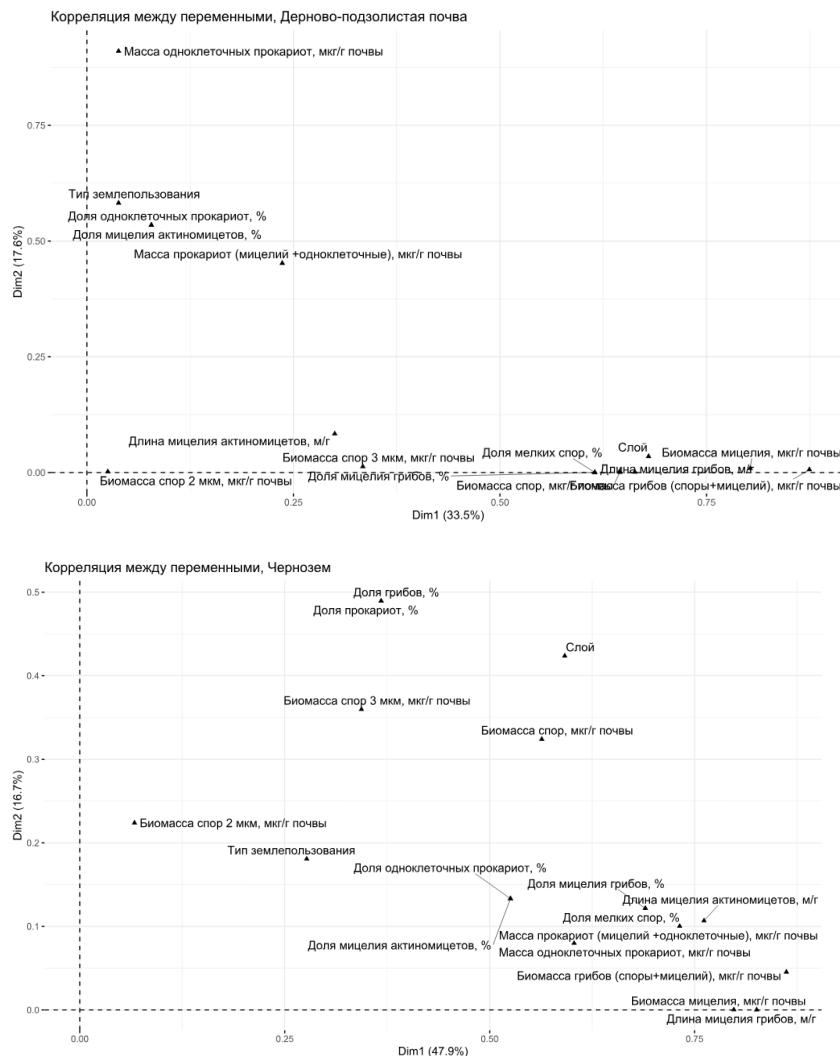
**Рис. S7.** Результаты факторного анализа для дерново-подзолистой почвы: влияние переменных на оси X и Y.

**Fig. S7.** Results of factor analysis for sod-podzolic soil: influence of variables on X and Y axes.



**Рис. S8.** Результаты факторного анализа для чернозема: влияние переменных на оси X и Y.

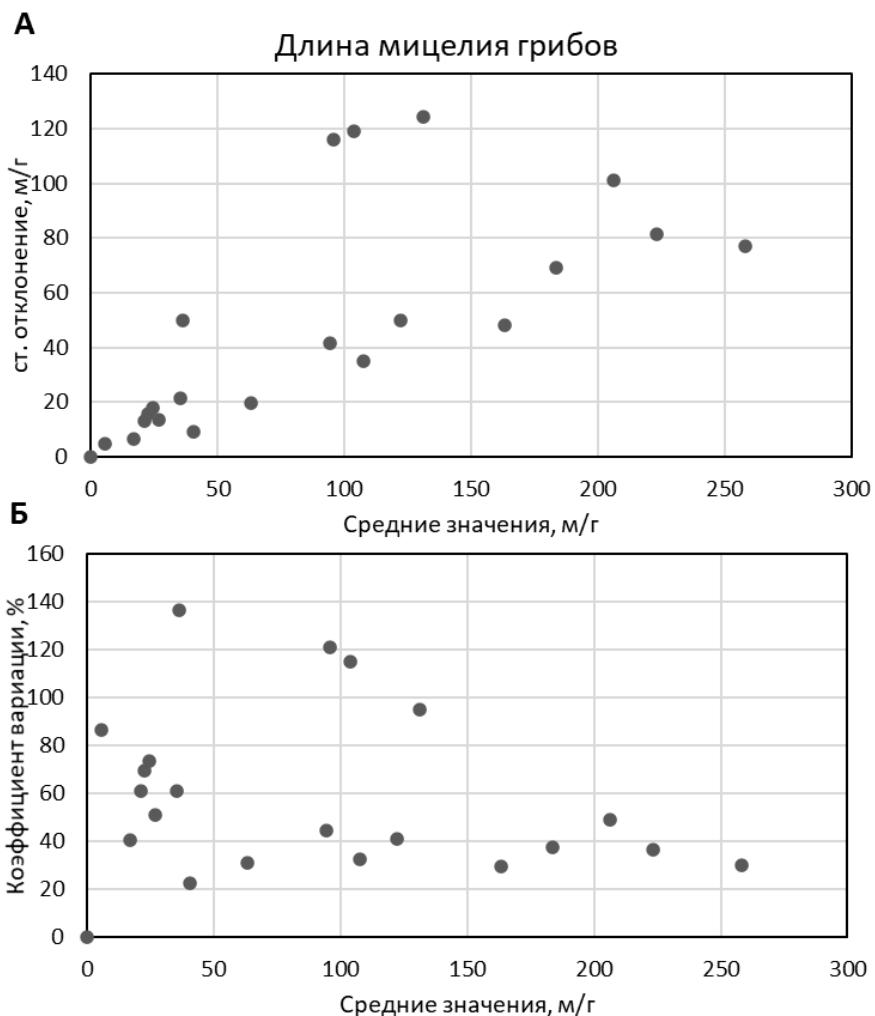
**Fig. S8.** Results of factor analysis for chernozem: influence of variables on X and Y axes.



**Рис. S9.** Факторный анализ показателей люминесцентной микроскопии по методу главных компонент для дерново-подзолистой почвы и чернозема.

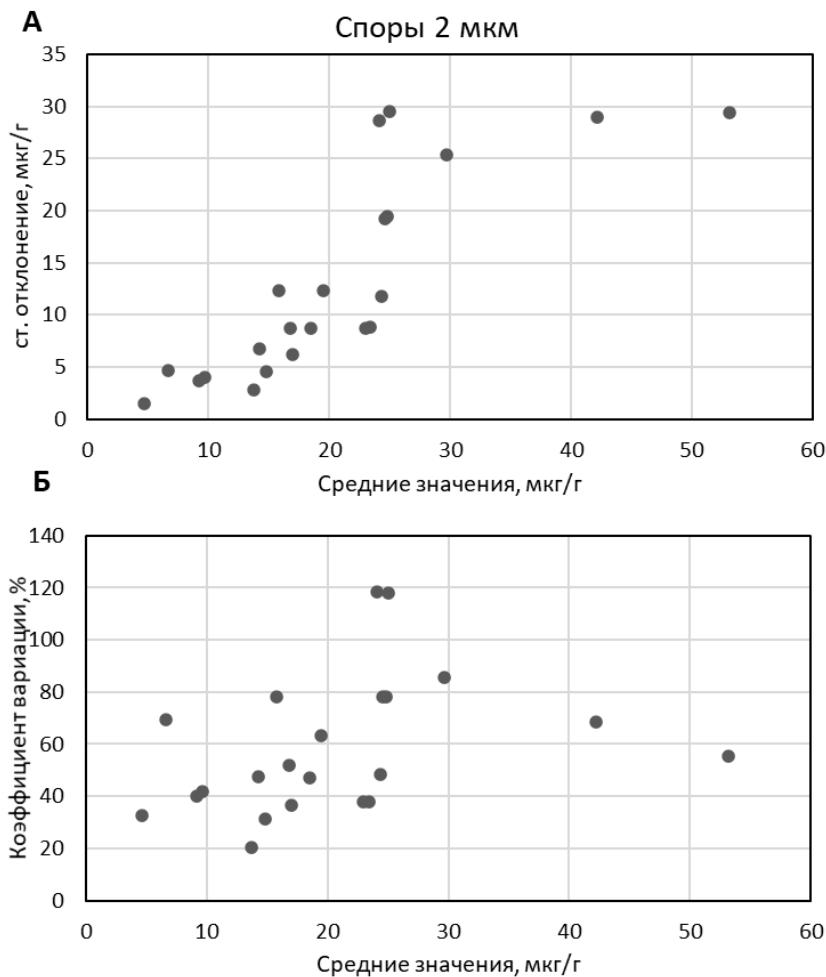
**Fig. S9.** Factor analysis of luminescence microscopy indices by principal component method for sod-podzolic soil and chernozem.

**Пространственное варьирование показателей на основе люминесцентной микроскопии в связи с их средним значением.** Ранее нами было показано, что величина стандартного отклонения увеличивается по мере увеличения среднего значения  $C_{\text{org}}$ , в то время как коэффициент вариации незначимо изменяется при изменении среднего значения  $C_{\text{org}}$  как при группировке данных по виду угодья для всей совокупности данных, так и при группировке по разным типам почв. Для большинства микробиологических показателей структуры микробного пула углерода был характерен схожий тип связи между величинами средних значений и соответствующими стандартными отклонениями, за исключением удельных значений (долей) и общей биомассы прокариот (рис. S10–S21). Как и в случае с  $C_{\text{org}}$ , коэффициенты вариации практически не изменились при увеличении средних значений рассматриваемых показателей, находясь на уровне 20–40%, однако повышаясь вплоть до 100% в некоторых участках отбора (рис. S10–S21). Стандартное отклонение для аналитических повторностей составляло в среднем 3–10% от средних значений величин (рис. S22).



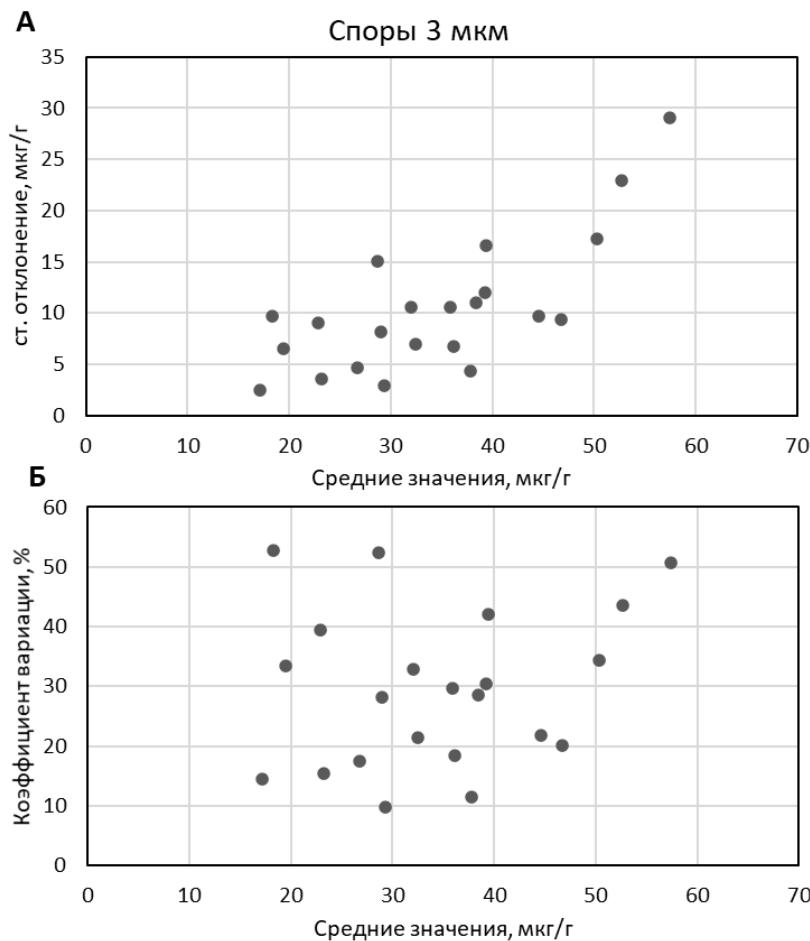
**Рис. S10.** Связь средних значений длины мицелия со А) стандартными отклонениями и Б) коэффициентами вариации в исследуемой группе образцов ( $N = 90$ ).

**Fig. S10.** Correlation of mean mycelial length values with А) standard deviations and Б) coefficients of variation in the studied samples ( $N = 90$ ).



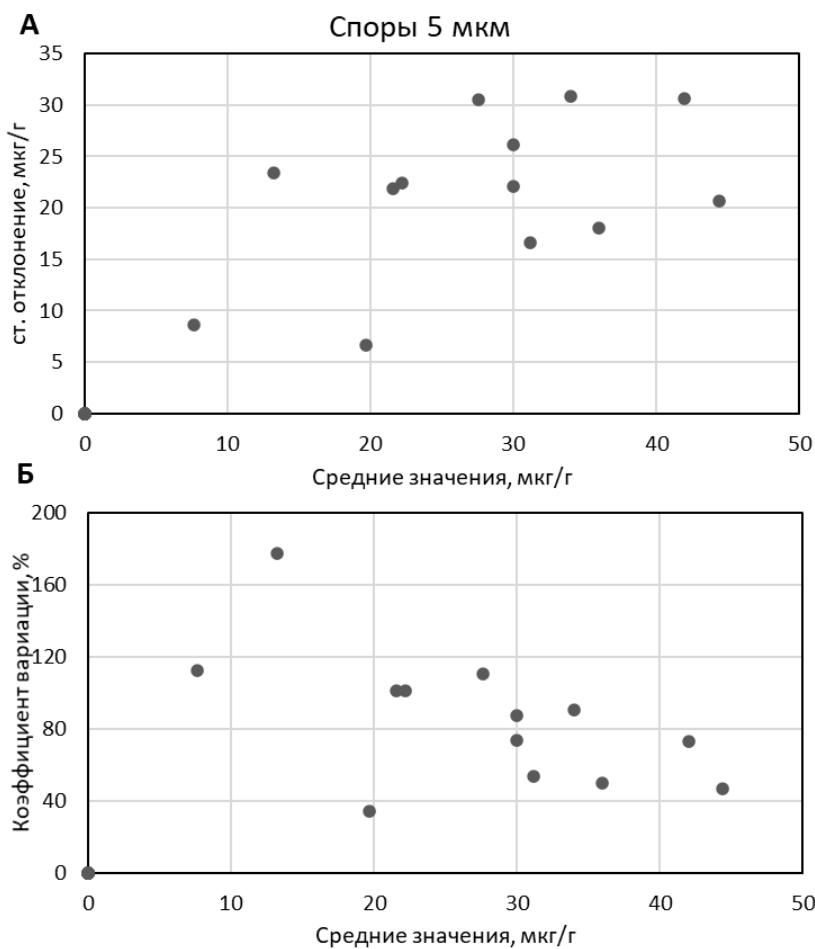
**Рис. S11.** Связь средних значений биомассы спор грибов диаметром до 2 мкм со А) стандартными отклонениями и Б) коэффициентами вариации в исследуемой группе образцов ( $N = 90$ ).

**Fig. S11.** Correlation of mean values of fungal spore biomass up to 2  $\mu\text{m}$  in diameter with А) standard deviations and Б) coefficients of variation in the studied samples ( $N = 90$ ).



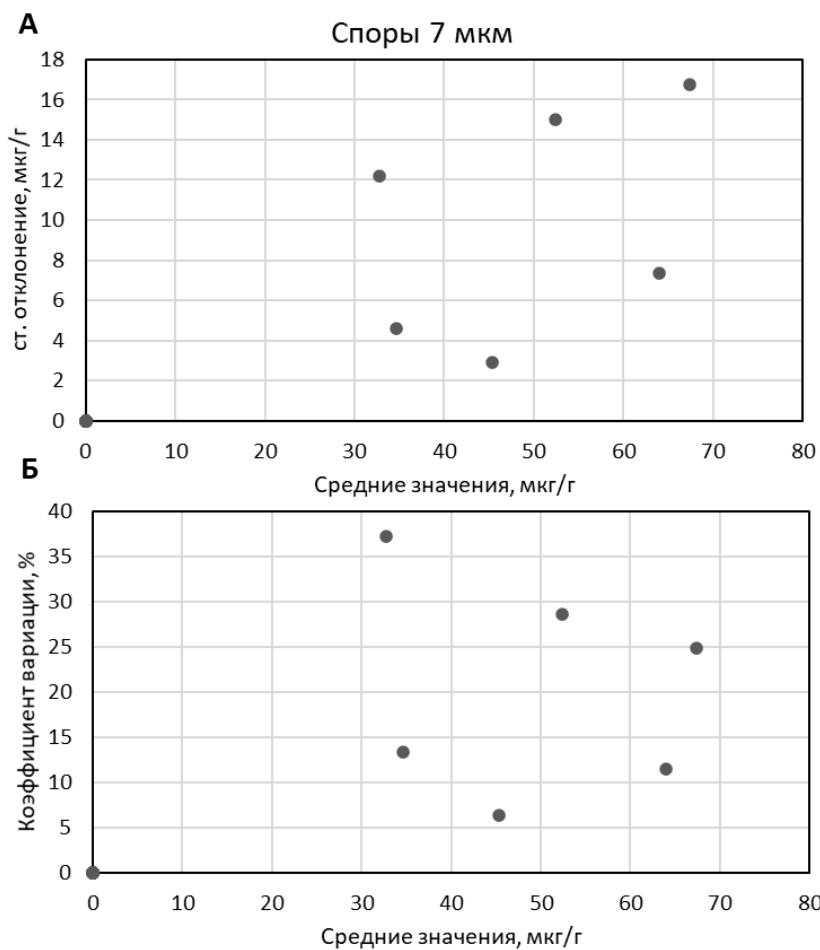
**Рис. S12.** Связь средних значений биомассы спор грибов диаметром 3 мкм со А) стандартными отклонениями и Б) коэффициентами вариации в исследуемой группе образцов ( $N = 90$ ).

**Fig. S12.** Correlation of mean values of 3  $\mu\text{m}$  diameter fungal spore biomass with A) standard deviations and Б) coefficients of variation in the studied samples ( $N = 90$ ).



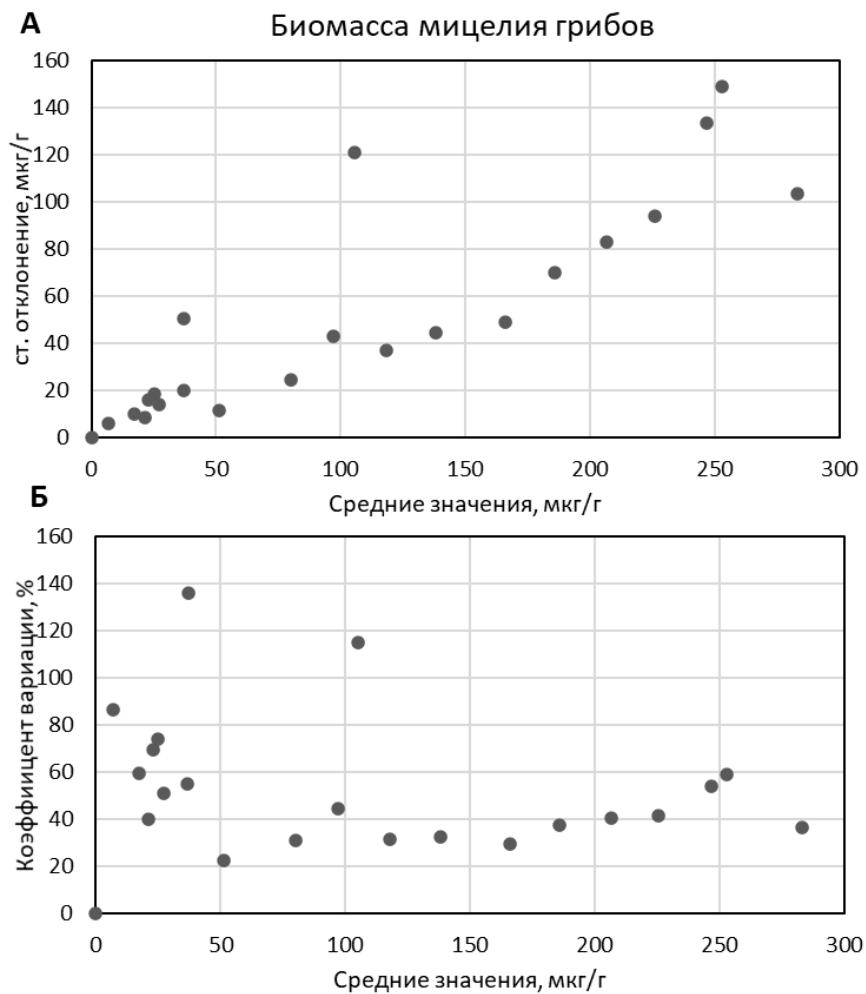
**Рис. S13.** Связь средних значений биомассы спор грибов диаметром 5 мкм со А) стандартными отклонениями и Б) коэффициентами вариации в исследуемой группе образцов ( $N = 90$ ).

**Fig. S13.** Correlation of mean values of 5  $\mu\text{m}$  diameter fungal spore biomass with A) standard deviations and B) coefficients of variation in the studied samples ( $N = 90$ ).



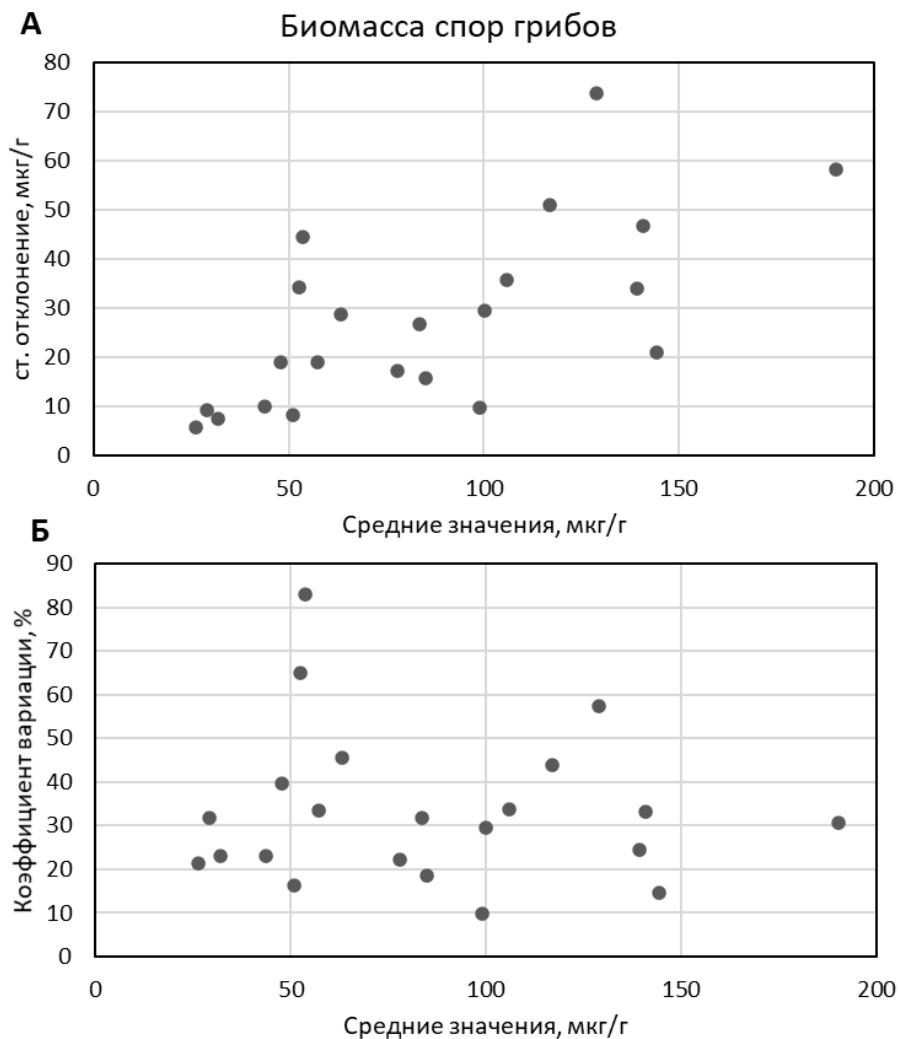
**Рис. S14.** Связь средних значений биомассы спор грибов диаметром 7 мкм со А) стандартными отклонениями и Б) коэффициентами вариации в исследуемой группе образцов ( $N = 90$ ).

**Fig. S14.** Correlation of mean values of 7 µm diameter fungal spore biomass with A) standard deviations and B) coefficients of variation in the studied samples ( $N = 90$ ).



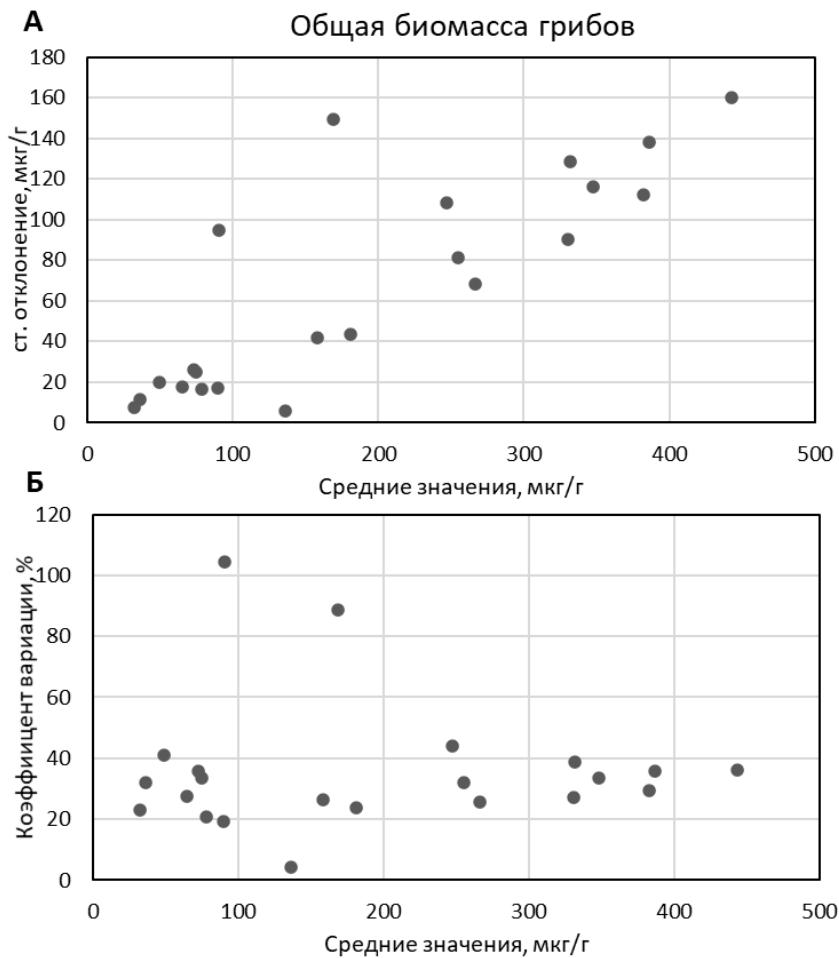
**Рис. S15.** Связь средних значений биомассы мицелия грибов со А) стандартными отклонениями и Б) коэффициентами вариации в исследуемой группе образцов ( $N = 90$ ).

**Fig. S15.** Correlation of mean values of fungal mycelial biomass with A) standard deviations and Б) coefficients of variation in the studied samples ( $N = 90$ ).



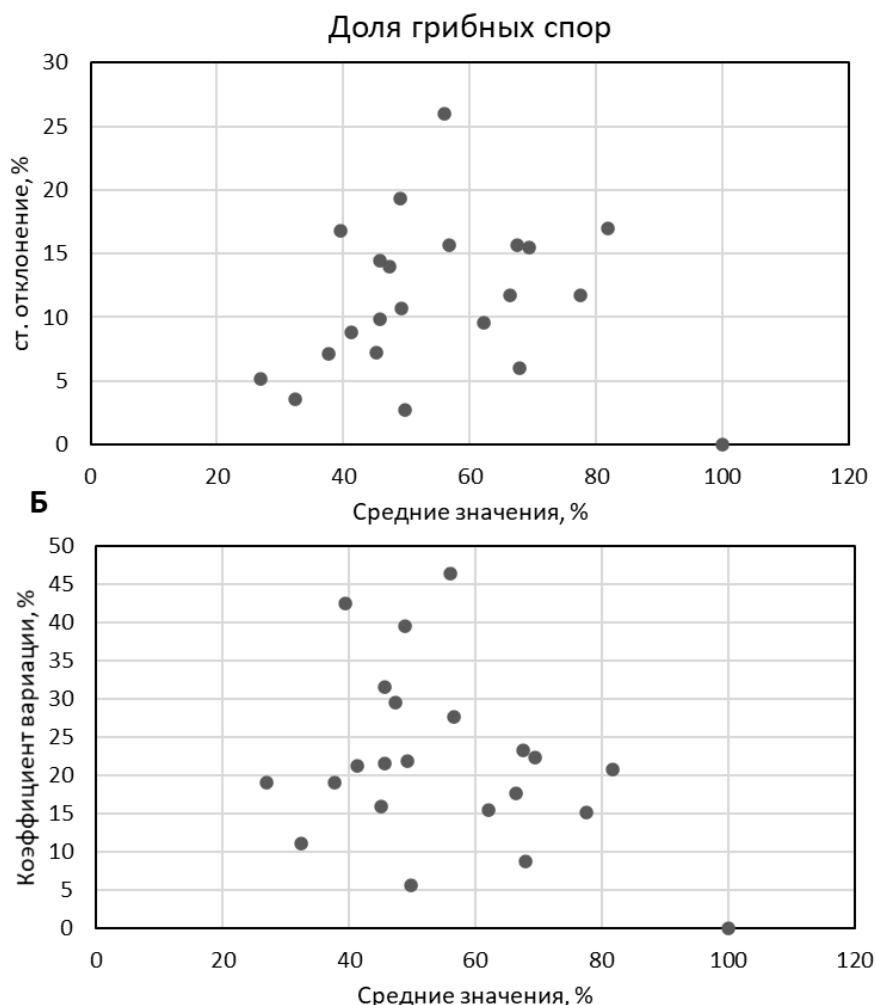
**Рис. S16.** Связь средних значений биомассы спор грибов со А) стандартными отклонениями и Б) коэффициентами вариации в исследуемой группе образцов ( $N = 90$ ).

**Fig. S16.** Correlation of mean values of fungal spore biomass with A) standard deviations and B) coefficients of variation in the studied samples ( $N = 90$ ).



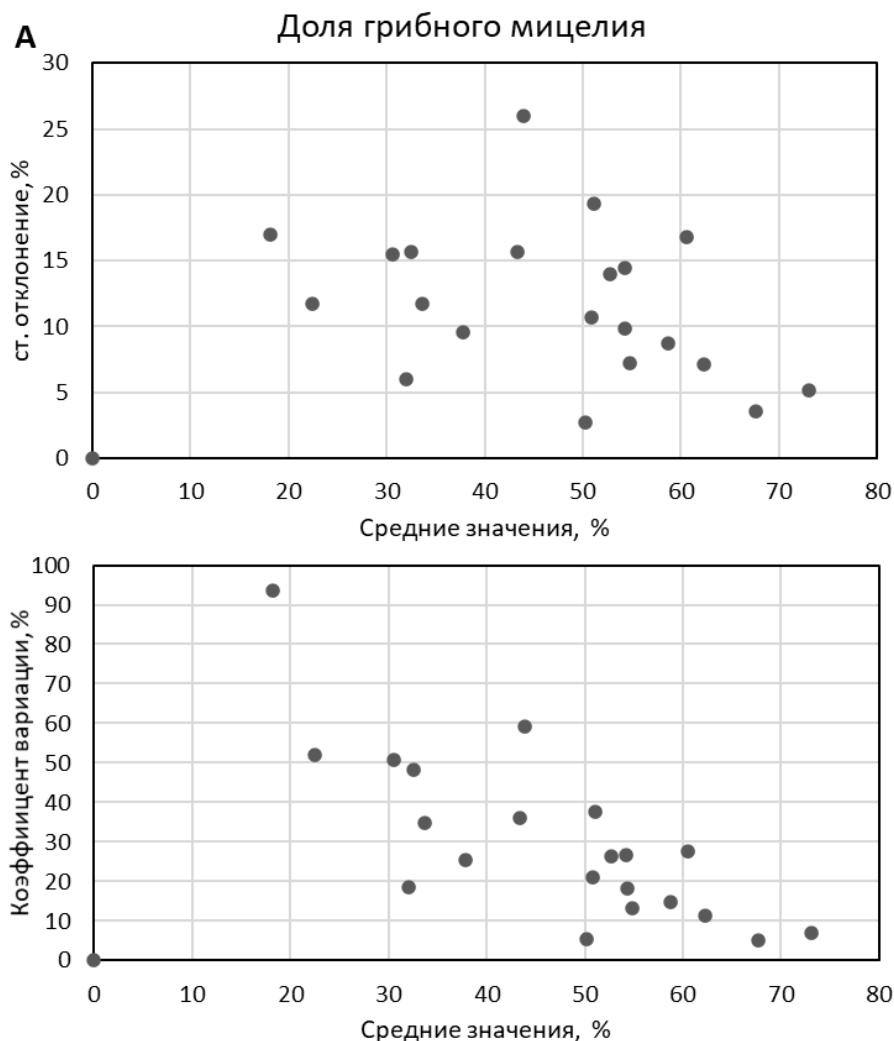
**Рис. S17.** Связь средних значений общей биомассы грибов со А) стандартными отклонениями и Б) коэффициентами вариации в исследуемой группе образцов ( $N = 90$ ).

**Fig. S17.** Correlation of mean values of total fungal biomass with A) standard deviations and B) coefficients of variation in the studied samples (N = 90).



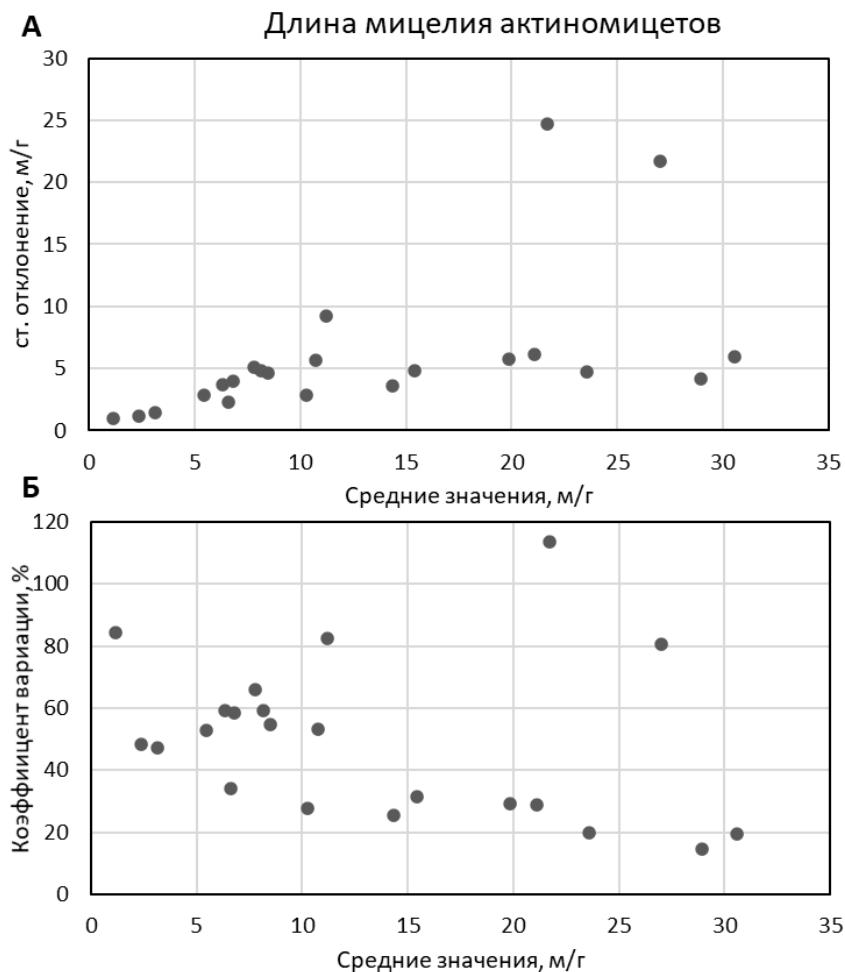
**Рис. S18.** Связь средних значений доли грибных спор со А) стандартными отклонениями и Б) коэффициентами вариации в исследуемой группе образцов ( $N = 90$ ).

**Fig. S18.** Correlation of mean values of fungal spore fraction with A) standard deviations and B) coefficients of variation in the studied samples ( $N = 90$ ).



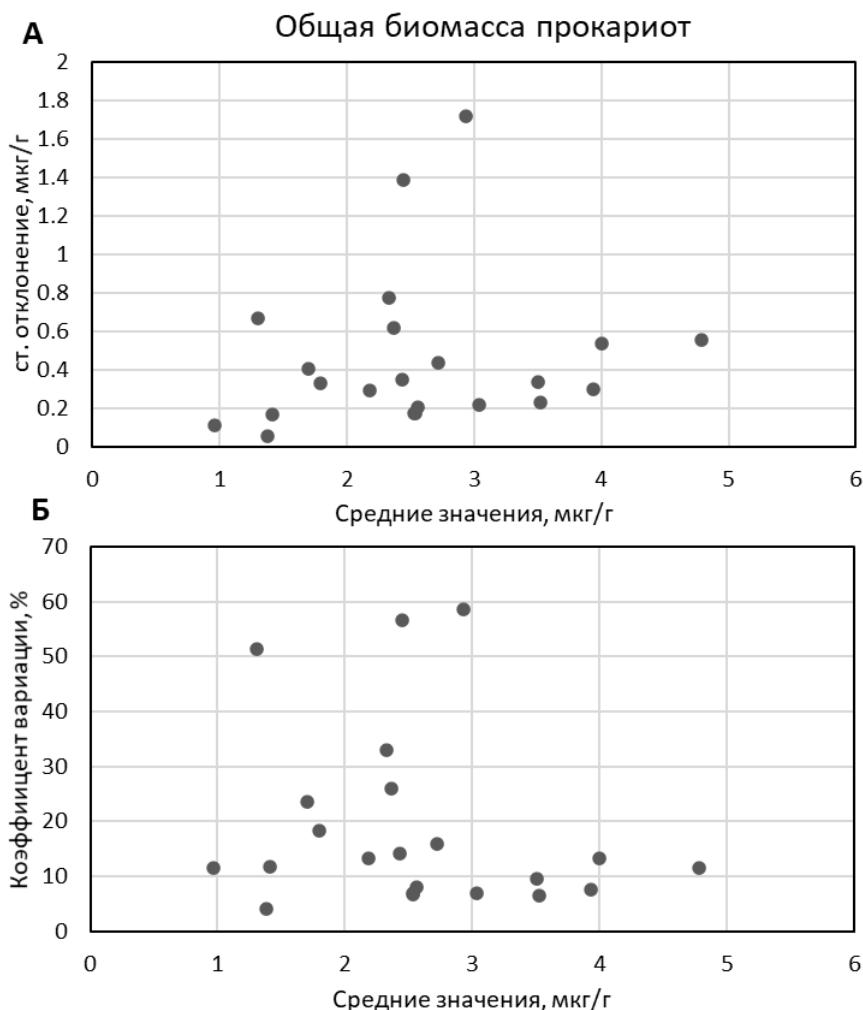
**Рис. S19.** Связь средних значений доли грибного мицелия со А) стандартными отклонениями и Б) коэффициентами вариации в исследуемой группе образцов ( $N = 90$ ).

**Fig. S19.** Correlation of mean values of fungal mycelium fraction with A) standard deviations and B) coefficients of variation in the studied samples ( $N = 90$ ).



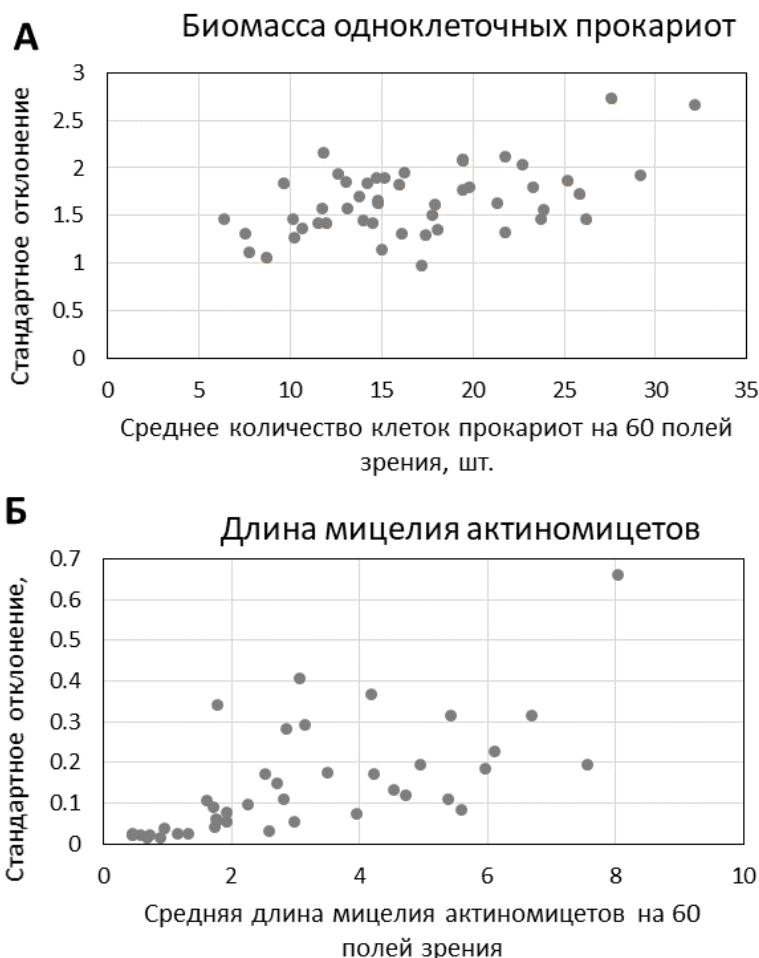
**Рис. S20.** Связь средних значений длины мицелия актиномицетов со А) стандартными отклонениями и Б) коэффициентами вариации в исследуемой группе образцов ( $N = 90$ ).

**Fig. S20.** Correlation of mean values of actinomycete mycelial length with A) standard deviations and B) coefficients of variation in the studied samples ( $N = 90$ ).



**Рис. S21.** Связь средних значений общей биомассы прокариот со А) стандартными отклонениями и Б) коэффициентами вариации в исследуемой группе образцов ( $N = 90$ ).

**Fig. S21.** Correlation of mean values of total prokaryote biomass with A) standard deviations and B) coefficients of variation in the studied samples ( $N = 90$ ).



**Рис. S22.** Связь средних значений для аналитических повторностей А) количества клеток прокариот и Б) длины мицелия актиномицетов со стандартными отклонениями на основе 60 полей зрения микроскопа в исследуемой группе образцов ( $N = 90$ ).

**Fig. S22.** Correlation of mean values of total prokaryotic biomass with A) standard deviations and Б) coefficients of variation in the studied samples ( $N = 90$ ).

УДК 631.4



DOI: 10.19047/0136-1694-2025-126-204-229



#### Ссылки для цитирования:

Сайранова П.Ш., Еремченко О.З. Влияние тяжелых металлов на ферментативную активность почв природно-рекреационной зоны г. Перми (модельный опыт) // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2025. Вып. 126. С. 204-229. DOI: 10.19047/0136-1694-2025-126-204-229

#### Cite this article as:

Sairanova P.Sh., Eremchenko O.Z., The influence of heavy metals on the enzyme activity within the soils of the nature recreation zone in Perm, Dokuchaev Soil Bulletin, 2025, V. 126, pp. 204-229, DOI: 10.19047/0136-1694-2025-126-204-229

#### Благодарность:

Исследование выполнено при поддержке гранта Минобрнауки РФ, проект FSNF-2020-0021.

#### Acknowledgments:

The study was supported by a grant from the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, project FSNF-2020-0021.

## Влияние тяжелых металлов на ферментативную активность почв природно-рекреационной зоны г. Перми (модельный опыт)

© 2025 г. П. Ш. Сайранова\*, О. З. Еремченко\*\*

Пермский государственный национальный исследовательский университет, Россия,

614990, Пермь, ул. Букирева, д. 15,

\*<https://orcid.org/0000-0003-4121-0859>, e-mail: [sairanova.p@gmail.com](mailto:sairanova.p@gmail.com),

\*\*<https://orcid.org/0000-0003-3581-0874>, e-mail: [eremch@psu.ru](mailto:eremch@psu.ru).

Поступила в редакцию 05.12.2024, после доработки 25.12.2025,  
принята к публикации 13.11.2025

**Резюме:** Целью работы была оценка изменения ферментативной активности (каталазы, уреазы и инвертазы) в дерново-элювоземе и темногумусовой почве при смоделированном загрязнении Cd, Cu, Zn, Pb. Активность ферментов является одним из индикаторов токсичности металлов в почвах. Для создания необходимых уровней загрязнения в

исследуемые почвы вносили растворы уксуснокислых солей Cd, Cu, Zn, Pb с концентрациями: 0 (контроль), 2,5, 5, 10, 25, 50, 100, 250, 500, 1000, 1500 мг/кг почвы. По генетическим свойствам темногумусовые почвы обладают более высокой устойчивостью к поллютантам в отличие от дерново-элювозема. Содержание органического вещества в темногумусовой почве в среднем составляет 7.0%, реакция среды близка к нейтральной. Гранулометрический состав изменяется в профиле от тяжелосуглинистого до среднеглинистого, а дерново-элювозем – легкосуглинистый, кислый и с меньшим содержанием гумуса. Определение критического уровня загрязненности, выраженного через активности каталазы, уреазы и инвертазы, подтвердило повышенную устойчивость темногумусовой почвы. Среди изученных показателей наиболее чувствительным к загрязнению обеих почв тяжелыми металлами оказалась активность уреазы: она снизилась в дерново-элювоземе при внесении Cd и Cu в количестве от 100 мг/кг и выше, в темногумусовой почве – при внесении Cd от 100 мг/кг и выше, а Cu – от 1000 мг/кг и выше. Негативное воздействие Pb проявилось только в темногумусовой почве, где активность уреазы понижалась при загрязнении от 250 мг/кг и выше. Активность фермента была устойчивой при загрязнении почв Zn, снижение показателя отметили лишь при максимальной дозе (1500 мг/кг). Особенность каталазной и инвертазной активности в обеих почвах проявилась в их усилении при повышенном загрязнении, что обусловлено, по-видимому, снижением активности микроорганизмов. При анализе сравнительной токсичности металлов установлено, что Cu, несмотря на свое биогенное значение, отличалась усиленным экотоксикологическим эффектом по сравнению с Zn и Cd; наименьшее воздействие на ферментативную активность оказало внесение Pb.

**Ключевые слова:** уреаза; каталаза; инвертаза; тяжелые металлы; устойчивость почв.

## The influence of heavy metals on the enzyme activity within the soils of the nature recreation zone in Perm (Model Experiment)

© 2025 P. Sh. Sairanova\*, O. Z. Eremchenko\*\*

Perm State National Research University,  
15 Bukireva Str., Perm 614990, Russian Federation,

\*<https://orcid.org/0000-0003-4121-0859>, e-mail: [sairanova.p@gmail.com](mailto:sairanova.p@gmail.com),  
\*\*<https://orcid.org/0000-0003-3581-0874>, e-mail: [eremch@psu.ru](mailto:eremch@psu.ru).

Received 05.12.2024, Revised 25.12.2025, Accepted 13.11.2025

**Abstract:** The aim of this study was to assess the change in enzyme activity (catalase, urease, and invertase) in soddy-eluvzem and dark humus soil under simulated contamination with Cd, Cu, Zn, and Pb. Enzyme activity serves as one of the indicators of metal toxicity in soils. Appropriate levels of pollution were established in preserved media using solutions of acetic acid salts of Cd, Cu, Zn, and Pb with concentrations of 0 (control), 2.5, 5, 10, 25, 50, 100, 250, 500, 1000, and 1500 mg/kg. Based on genetic properties, dark humus soils exhibit greater resistance to pollutants compared to soddy-eluvzem. The average organic matter content in dark humus soil reaches 7.0%, with nearly neutral pH, while the granulometric composition varies from heavy loamy to medium clayey, and sod-eluvzem is characterized by light loamy texture, acidity, and a lower humus content. The assessment of the critical pollution threshold, indicated by the activity levels of catalase, urease, and invertase, demonstrates the enhanced stability of dark humus soil. Among the indicators studied, the urease activity emerged as the most sensitive indicator of heavy metal pollution in both types of soil; it decreased in sod-eluvzem with the introduction of Cd and Cu starting at 100 mg/kg and higher, while in dark humus soil, the decline occurred with the introduction of Cd starting at 100 mg/kg and higher and Cu starting at 1000 mg/kg and higher. The negative impact of Pb was observed only in dark humus soil, where urease activity decreased under pollution levels of 250 mg/kg and greater. The enzyme activity remained consistent when the soil was contaminated with Zn, with a decrease in the indicator observed only at elevated doses (1500 mg/kg). A notable feature of catalase and invertase activity in both soils was their increase under higher levels of contamination, which is presumably due to a decrease in microbial activity. When analyzing the comparative toxicity of metals, it was found that Cu, despite its biogenic significance, exhibited a greater ecotoxicological effect when compared to Zn and Cd; the introduction of Pb had the minimal effect on enzyme activity.

**Keywords:** urease; catalase; invertase; heavy metals; soil stability.

## ВВЕДЕНИЕ

Ферментативная активность почвы является общим термином для внутриклеточных и внеклеточных ферментов, вырабатываемых почвенными микроорганизмами, корнями растений и другими биологическими клетками в почве (Burns et al., 2013; Rao et

al., 2014). Почвенные ферменты участвуют в формировании специфических биологических путей трансформации вещества и энергии в естественных и антропогенно измененных экосистемах. Они определяют доступность питательных веществ для организмов и способность почвы к самоочищению от загрязнения. Исследуя ферментативную активность почвы, можно оценить функциональную активность почвенной биоты, плодородие почвы, загрязненность тяжелыми металлами (ТМ), нефтью, устойчивость к антропогенному воздействию, а также проследить множество биохимических процессов, протекающих в почве, таких как гумусообразование, нитрификация, азотфиксация и др. (Новоселова, 2009; Utobo, Tewari, 2015; Kiruba, Thatheyus, 2021).

Биохимические параметры (активность ферментов) реагируют на мельчайшие изменения в почве, в том числе вызванные ее загрязнением. В отличие от физических и химических свойств они могут дать немедленную и точную информацию об изменениях качества почвы, необходимую для принятия решения о вариантах управления ее плодородием на более ранних стадиях деградации (Bastida et al., 2006; Paz-Ferreiro, Fu, 2016; Kocak, 2020). Показатели активности фермента относительно стабильны, методы определения ферментативной активности чувствительны, практичны и просты в исполнении и отличаются низким значением ошибки; показатели отражают восприимчивость к низким дозам загрязняющего вещества (Rutigliano et al., 2009; Steinweg et al., 2013). Определение токсичности почв на основе изменения ферментативной активности перспективно и при комплексном загрязнении ТМ (Chaperon, Sauve, 2008).

Эколо-биологическая токсичность ТМ зависит от гранулометрического состава, содержания органического вещества, pH и окислительно-восстановительных условий в почве (Копчик, 2004; Ильин, 2012; Waalewijn-Kool et al., 2014; Hale et al., 2017; Поляк, Сухаревич, 2020). С помощью моделирования показано, что на уреазу влияют содержание ила, полугорных оксидов, pH, а емкость поглощения и содержание глины напрямую регулируют активность каталазы (Liu et al., 2024). В условиях загрязнения не только степень биохимического изменения почв, но и количество металлов, поступающих в другие системы (растения, грунтовые

воды), контролируются гранулометрическим составом почв, реакцией среды, содержанием органических веществ (Ильин, 2012; Heavy metals..., 2013; Jian et al., 2016; Хазиев, 2018; Копчик С.В., Копчик Г.Н., 2022).

Природно-рекреационные зоны городов испытывают повышенную нагрузку, связанную с поступлением выбросов ТМ от автотранспорта и промышленности (Водяницкий и др., 2012; Чупахина и др., 2012; Ушакова и др., 2020). В парках и городских лесах г. Перми сформировались редкие почвы на особых почвообразующих породах (Еремченко и др., 2016; Сайранова, Еремченко, 2024). Ограниченнная встречаемость и особые генетические свойства почв на перигляциальных песках, элювии пермских пород, двучленных отложениях сочетаются с относительно слабой изученностью и необходимостью особой охраны. В 2022 г. Постановлением Правительства Пермского края № 447-п эти почвы включены в перечень редких почв, находящихся под особой охраной Росреестра Пермского края (Об утверждении..., 2022). Проблема изучения устойчивости редких почв к загрязнению ТМ тесно связана с усиленной антропогенной нагрузкой, в том числе с выбросами ТМ, необходимостью организации мониторинга и выбором наиболее информативных показателей для оценки экологического состояния почв.

Цель работы – оценить изменение ферментативной активности (каталазы, уреазы и инвертазы) в дерново-элювоземе и темногумусовой почве при смоделированном загрязнении Cd, Cu, Zn и Pb.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объекты исследований – дерново-элювозем легкосуглинисто-супесчаный на подстилающей тяжелосуглинистой породе и темногумусовая почва на тяжелоглинистой карбонатной породе. В полевые сезоны 2022–2023 гг. заложены шесть почвенных разрезов: три – в дерново-элювоземе, и три – в темногумусовой почве; из них отобраны пробы по генетическим горизонтам.

Физико-химические и химические свойства почвенных проб определяли стандартными методами в аккредитованной научно-исследовательской лаборатории биогеохимии техногенных ланд-

шафтов ЕНИ ПГНИУ: pH водной и солевой вытяжки определялись потенциометрическим методом по ГОСТ 26423-85 и ГОСТ 26483-85; органическое вещество ( $C_{opr}$ ) определялось фотометрическим методом по ГОСТ 26213-2021; сумма обменных оснований рассчитана сложением обменного кальция и обменного (подвижного) магния, проанализированных титриметрическим методом – ГОСТ 26487-85; гидролитическая кислотность – по методу Каппена в модификации ЦИНАО (ГОСТ 26212-2021).

Гранулометрический состав определяли пипеточным методом Н.А. Качинского после разрушения почвенных агрегатов пи-рофосфатом натрия; условно валовое содержание ТМ – методом атомно-абсорбционной спектрофотометрии (разложение “царской водкой”).

Для определения критического уровня загрязненности из каждого почвенного разреза отбирали пробы с глубины 0–20 см и объединяли их в смешанные образцы: дерново-элюзовозем (ДЭ) и темногумусовая почва (ТГ). Смешанный образец дерново-элюзовозема легкосуглинистого состава по обменной кислотности – среднекислый, по гидролитической – очень сильно кислый, сумма обменных оснований – низкая, содержание органического вещества – 4.13% (табл. 1). Смешанный образец темногумусовой почвы имеет тяжелосуглинистый гранулометрический состав, содержание органического вещества составляет 6.01%, по реакции почвенной среды почти нейтральный, из-за высокого содержания обменного кальция (28 ммоль/100 г) сумма обменных оснований очень высокая.

Воздушно-сухие образцы почв просеивали через сито с отверстиями диаметром 5 мм. В полистироловые контейнеры помещали просеянные навески почв (100 г) и по отдельности вносили растворы уксуснокислых солей кадмия  $Cd(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$ , меди  $Cu(CH_3COO)_2 \cdot H_2O$ , цинка  $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$  и свинца  $Pb(CH_3COO)_2 \cdot 3H_2O$  из расчета содержания металлов: 0 (контроль), 2.5, 5, 10, 25, 50, 100, 250, 500, 1000, 1500 мг/кг почвы. Широкий диапазон вносимых доз позволяет проследить динамику изменения ферментативной активности от минимальных ориентировочно допустимых концентраций (Об утверждении..., 2021) к значениям, характерным для почв, загрязненных промышленными выбро-

сами (Ильин, 2012).

**Таблица 1.** Физико-химические свойства смешанных образцов почв  
**Table 1.** Physico-chemical properties of mixed samples of soils

Образец	C <sub>опт</sub> , %	pH <sub>вод</sub>	pH <sub>сол</sub>	S, ммоль/100 г	Hг, ммоль/100 г	Физическая глина, %	Cu, мг/кг	Zn, мг/кг	Cd, мг/кг	Pb, мг/кг
ДЭ	4.13	5.4	4.2	7.6	8.1	24.95	13.8	40.7	0.29	11.9
ТГ	6.01	6.6	5.6	33.5	3.7	49.88	25.5	52.0	0.38	9.3

**Примечание.** S – сумма оснований; Hг – гидролитическая кислотность.  
**Note.** S – sum of bases; Hg – hydrolytic acidity.

При изучении ферментативной активности почв рекомендуют строго соблюдать условия подготовки и выполнения анализов в нескольких аналитических повторностях (Даденко и др., 2013). Для снижения ошибки результатов модельного опыта выработали единую цепочку действий при исследовании ферментативной активности загрязненных почв. После увлажнения растворами солей в почвенные образцы высевали семена крестоцветных (*Lepidium sativum* L.) в количестве 0.5 г на контейнер. Растения выращивали на загрязненных почвенных пробах в течение 7 дней. Посев и выращивание растений проводили с целью активации пульпа микроорганизмов, поскольку микроорганизмы находятся в разных состояниях активности (активные, потенциально активные, спящие). У каждого состояния микробиоты своя быстрота реакции на изменение окружающей среды (Blagodatskaya, Kuzyakov, 2013). В условиях загрязнения почв может измениться устойчивость микробиоты (Paz-Ferreiro, Fu, 2016; Kocak, 2020). Через 7 дней растительные остатки удаляли из образцов, почву сушили, растирали. Для каждого варианта загрязнения определяли активность каталазы, уреазы и инвертазы в 3-кратной повторности.

Активность каталазы определяли титрометрическим методом с использованием раствора H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> концентрации 1.5 моль/дм<sup>3</sup>,

0.3%-ного раствора  $\text{H}_2\text{O}_2$  и перманганата калия в качестве титранта. Уреазу изучили через гидролиз карбамида до аммонийного азота и углекислого газа с колориметрическим окончанием. Колориметрическим методом по измерению содержания редуцирующих сахаров вычисляли активность инвертазы (Хазиев, 2005).

Сравнение вариантов опыта по ферментативной активности почвы проведено дисперсионным методом с применением критерия Краскела-Уоллиса; значимыми считались различия между сравниваемыми средними величинами с доверительной вероятностью 95% и выше ( $P < 0.05$ ). На рисунках приведены средние арифметические повторности и их стандартные ошибки.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Устойчивость почв к загрязнению ТМ обусловлена содержанием органического вещества, реакцией среды, содержанием питательных элементов, оксидов марганца и железа, гранулометрическим составом (Водяницкий, 2009; Ильин, 2012; Jian et al., 2016).

Генетические свойства темногумусовых почв указывают на повышенную устойчивость к ТМ. Содержание органического вещества в них варьирует в пределах 6.56–7.73%, реакция среды близка к нейтральной, гранулометрический состав изменяется в профиле от тяжелосуглинистого до среднеглинистого с преобладанием пылевато-иловатых частиц (табл. 2). На фоне темногумусовой почвы легкосуглинистые и кислые дерново-элюзовозмы с меньшим содержанием гумуса имеют более низкий защитный потенциал в отношении загрязнения ТМ.

Современный уровень содержания Cu, Zn и Cd в верхних горизонтах темногумусовых почв заметно выше, чем в дерново-элюзовозмах (табл. 3), что обусловлено химизмом почвообразующих глин. Коэффициенты концентрации (КК), рассчитанные как отношение между содержанием металлов в горизонте и почвообразующей породе, показали, что для верхних горизонтов исследуемых почв характерно накопление Cu, Zn и Cd, обусловленное биогенной аккумуляцией и возможным поступлением поллютантов.

**Таблица 2.** Физико-химические свойства исследуемых почв

**Table 2.** Physico-chemical properties of the studied soils

Горизонт, глубина, см	n	C <sub>опр</sub> , %	pH вод	pH сол	Ca обм., ммоль/ 100 г	Mg обм., ммоль/ 100 г	Hg, ммоль/ 100 г	Физическ ая глина, %
Дерново-элювоземы								
AY, 0–12	3	5.7 ± 1.2	5.4 ± 0.3	4.2 ± 0.4	8.3 ± 1.3	1.4 ± 0.8	5.0 ± 2.2	32.0 ± 5.4
AYel, 12–23	3	2.8 ± 1.0	5.2 ± 0.3	3.9 ± 0.2	4.0 ± 2.1	0.9 ± 0.4	7.3 ± 0.3	30.1 ± 6.8
EL, 23–32	3	1.7 ± 1.0	5.4 ± 0.2	3.9 ± 0.1	3.9 ± 2.6	0.9 ± 0.3	5.7 ± 0.4	26.6 ± 9.0
Del, 75–85	3	0.7 ± 0.1	5.9 ± 0.3	3.9 ± 0.1	14.8 ± 4.3	3.8 ± 1.0	4.6 ± 0.1	40.1 ± 9.1
D, 124–134	3	0.7 ± 0.1	6.1 ± 0.4	4.0 ± 0.1	18.0 ± 4.0	6.2 ± 2.0	3.5 ± 0.4	45.9 ± 4.8
Темногумусовые почвы								
AU, 0–13	3	7.0 ± 0.6	6.4 ± 0.3	5.3 ± 0.4	25.5 ± 3.0	3.6 ± 1.9	4.2 ± 1.2	47.3 ± 0.1
AUro, 13–27	3	2.8 ± 1.1	5.8 ± 0.2	4.0 ± 0.2	23.6 ± 6.3	2.6 ± 2.1	5.6 ± 0.7	50.7 ± 10.3
ACro, 27–41	3	1.9 ± 0.9	5.9 ± 0.1	3.8 ± 0.2	26.7 ± 6.4	2.2 ± 1.3	5.9 ± 1.7	57.9 ± 14.0
Cro,m,i, 58–71	3	1,1 ± 0.3	5.8 ± 0.2	3.9 ± 0.1	32,8 ± 2.6	2.5 ± 1.4	4.4±1.1	51.6 ± 20.6
Cca, 112–122	3	0.8 ± 0.1	7.9 ± 1.1	6.2 ± 1.4	—*	—	1.2 ± 1.4	60.2 ± 25.2

**Примечание.** n – количество проб; \* – не определяли обменные катионы в карбонатных горизонтах почв.

**Note.** n – number of samples; \* – exchangeable cations in carbonate soil horizons are not absorbed.

Напротив, в процессе формирования темногумусовой почвы Cu рассеивалась. В дерново-элювоземе пониженное количество Cu в гумусовом горизонте может быть обусловлено разным химизмом почвообразующей и подстилающей пород.

**Таблица 3.** Содержание тяжелых металлов в почвах  
**Table 3.** Heavy metal content in soils

Горизонт, глубина, см	Cu		Zn		Cd		Pb	
	мг/кг	КК*	мг/кг	КК	мг/кг	КК	мг/кг	КК
Дерново-элювоземы								
AY**, 0–12	14.5 ± 0.3	0.5	42.3 ± 1.7	1.5	0.28 ± 0.01	1.2	11.4 ± 0.6	1.2
AYel, 12–23	12.6 ± 0.6	0.5	21.0 ± 1.0	0.7	0.19 ± 0.02	0.9	11.3 ± 3.0	1.2
EL, 23–32	12.3 ± 0.9	0.5	18.4 ± 1.2	0.6	0.14 ± 0.02	0.6	6.9 ± 0.6	0.7
Del, 75–85	24.7 ± 1.4	0.9	22.5 ± 0.7	0.8	0.17 ± 0.02	0.7	8.4 ± 0.7	0.9
D, 125–134	26.8 ± 1.1	1.0	28.9 ± 2.0	1.0	0.23 ± 0.03	1.0	9.5 ± 0.7	1.0
Темногумусовые почвы								
AU**, 0–13	24.7 ± 0.8	0.6	52.2 ± 1.5	1.6	0.41 ± 0.01	0.9	9.9 ± 0.6	1.2
AUro, 13–27	27.1 ± 1.6	0.6	31.7 ± 2.1	1.0	0.17 ± 0.04	0.4	7.3 ± 0.7	0.9
ACro, 27–41	32.4 ± 2.2	0.7	27.7 ± 1.2	0.9	0.35 ± 0.02	0.8	10.7 ± 0.5	1.3
Cro,m,i, 58–71	48.6 ± 5.0	1.1	34.5 ± 2.4	1.1	0.23 ± 0.03	0.5	7.1 ± 0.9	0.8
Cca, 112–122	44.8 ± 5.5	1.0	32.1 ± 3.5	1.0	0.43 ± 0.08	1.0	8.4 ± 0.6	1.0

**Примечание.** \*КК – коэффициент концентрации – отношение между содержанием металлов в горизонте и почвообразующей породе; \*\* – определение проводилось в прокаленном образце.

**Note.** \*KK – concentration coefficient – the relationship between the content of metals in the horizon and the soil-forming rock; \*\* – determination was carried out in a calcined sample.

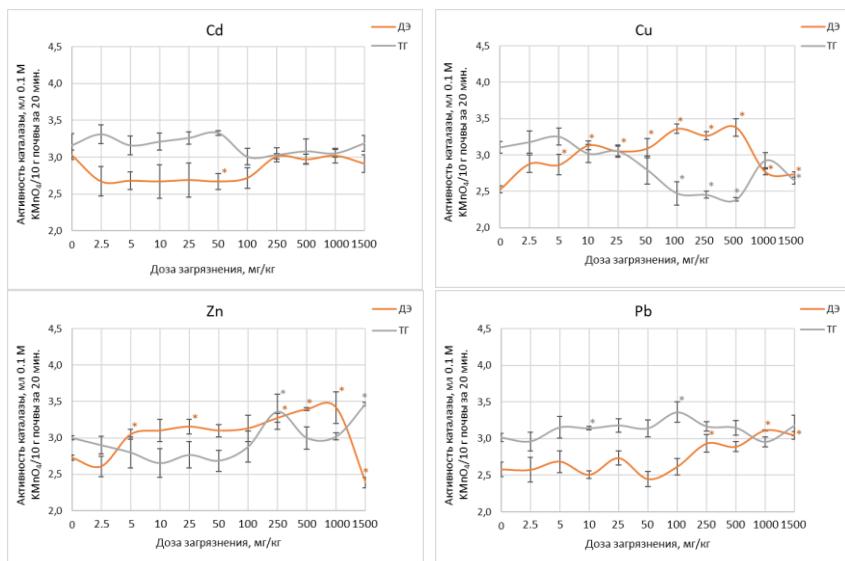
Катализ – фермент, катализирующий реакцию разложения перекиси водорода на кислород и воду; его активность отражает способность микробного сообщества противостоять воздействию стресс-факторов, предотвращая повреждение структуры и нарушение функций клеточной мембранны (Mahaseth, Kuzminov, 2017; Аладьева, Зиматкин, 2022).

Внесение в дерново-элювозем Cu и Zn в целом стимулировало активность каталазы (рис. 1). Медь во всех концентрациях (от 5 до 1500 мг/кг) увеличивала активность каталазы в среднем на 17.6%, а цинк в вариантах опыта 5–1000 мг/кг – в среднем на 14.7%. Доза Zn 1500 мг/кг показала критическую нагрузку и снизила активность каталазы на 14.2% относительно активности фермента в незагрязненной почве. Т.А. Трифонова и О.Н. Забелина (2017) наблюдали подобное стимулирование активности каталазы медью в почвах природно-рекреационной зоны г. Владимир. При добавлении разных доз Cd и Pb в дерново-элювозем не наблюдали значимых изменений в активности каталазы. Каталазу называют чувствительным почвенным ферментом (Liu et al., 2024); возможно, отсутствие токсического действия исследуемых ТМ обусловлено низкой обеспеченностью дерново-элювозема микроэлементами.

В темногумусовой почве наблюдали токсическое воздействие меди на активность каталазы. Начиная с дозы загрязнения Cu 100 мг/кг и выше, ферментативная активность снизилась почти в 1.5 раза относительно контрольного значения; с дальнейшим ростом загрязненности (1000 мг/кг и выше) активность фермента несколько усилилась. Дозы Zn от 250 до 1500 мг/кг стимулировали активность каталазы относительно контроля. При загрязнении Cd и Pb не выявлено значимого изменения активности этого фермента. Возможно, при загрязнении темногумусовой почвы происходил отбор устойчивых микроорганизмов, продуцирующих каталазу; так, бактерии *Burkholderia sp.*, *Bacillus sp.* (You et al., 2021) и идентифицированные штаммы *Bacterium strain IRHB1-74* и *Microbacterium sp.* SW615 (Ma et al., 2023) показали толерантность к Cd, а бактериальные группы *Pseudomonas* и *Arthrobacter* устойчивы к Pb (Zhang et al., 2012).

Активность каталазы у тяжелосуглинистой почвы во всех вариантах опыта выше, чем у дерново-элювозема. Это может быть связано с глинистым гранулометрическим составом и высоким содержанием органического вещества в темногумусовых почвах. Каталаза может сохраняться и функционировать в почве, будучи связанной с глинисто-гуминовыми комплексами. Глинистая фракция и гуминовые вещества оказывают положительное влияние на

активный центр каталазы (Calamai et al., 2000). Адсорбция ферментов (фосфатазы) на глинистых минералах может сделать иммобилизованный фермент более устойчивым к денатурации (Gianfreda, Ruggiero, 2006). В случае адсорбции ферментов на гумусовых веществах захват фермента стабилизирует молекулу ферментов, и токсикант не может их ингибировать (Gianfreda, Rao, 2010).



**Рис. 1.** Активность каталазы в зависимости от дозы загрязнения, мл 0.1 М  $\text{KMnO}_4$ /10 г почвы за 20 мин. **Примечание.** На этом и следующих рисунках представлены средние арифметические трех повторностей и их стандартные ошибки, \* указаны значимые изменения относительно контроля.

**Fig. 1.** Catalase activity depending on the degree of contamination, ml 0.1 M  $\text{KMnO}_4$ /10 g of soil in 20 minutes. **Note.** This and the following figures show the arithmetic means of three replicates and their standard errors, \* indicates significant changes relative to the control.

Активность фермента уреазы используется для характеристики азотного режима почвы и является показателем ее потенци-

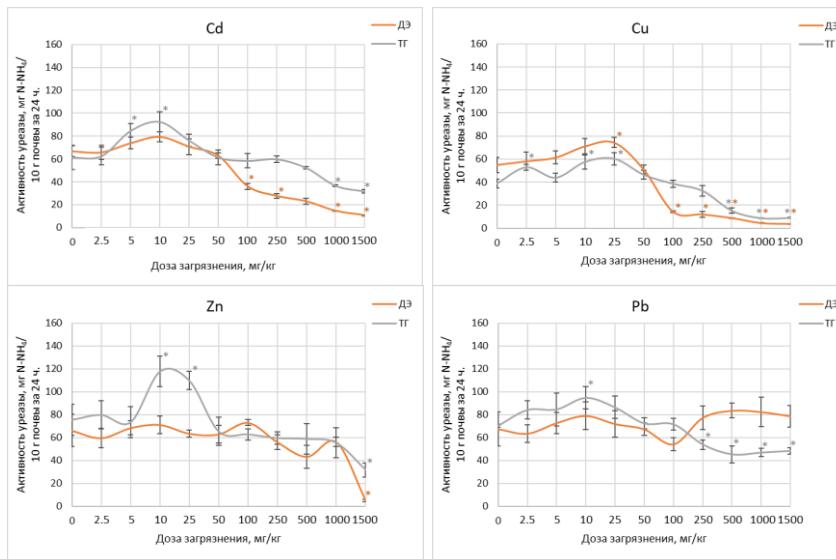
альной способности к минерализации азотсодержащих органических соединений (аммонификации) (Щербакова, 1983; Vasataga et al., 2012; Zhang et al., 2014; Kocak, 2020). Критические нагрузки в значительной степени зависят от свойств почв; ингибиование активности уреазы наблюдали при концентрации Cd 21.8 мг/кг (Liu et al., 2024), а также при комбинированном воздействии Pb и Cd – по 0.5 мг/кг глинистой почвы (Stagnic Anthrosol) (Yan et al., 2013).

Малые дозы внесения ТМ 2.5–25 мг/кг вызывали небольшое увеличение активности уреазы (рис. 2). Достоверно значимые изменения наблюдаются во всех вариантах загрязнения металлами темногумусовой почвы. Ранее Т.А. Трифоновой и О.Н. Забелиной (2017) описано усиление активности уреазы при загрязнении медью городских почв. Положительную стимуляцию фермента по сравнению с контролем наблюдали при внесении комбинаций металлов в почву (Chaperon, Sauve, 2008).

Высокие дозы металлов в обеих почвах вызывали снижение эффективности уреазы. Таким образом, активность уреазы оказалась наиболее чувствительным индикатором загрязнения, за исключением варианта с внесением Pb в дерново-элювазем. В дерново-элюваземе токсичность Cd и Cu проявлялась с дозы 100 мг/кг и выше; при максимальном загрязнении активность уреазы почти полностью подавлялась. В научных трудах представлена разная информация по влиянию металлов на активность уреазы. Кадмий называют наиболее токсичным металлом для ингибирования активности уреазы (Chaperon, Sauve, 2008). В результате внесения в почву растворов солей Pb, Zn и Cu установлена примерно одинаковая для всех металлов прямая зависимость степени ингибирования уреазы от количества токсиканта (Швакова, 2013).

Загрязнение металлами по-разному проявилось в темногумусовой почве. Достоверно значимое снижение активности уреазы отметили в варианте Cd 1000 мг/кг, Cu 500 мг/кг, Zn 1500 мг/кг, Pb 250 мг/кг. Загрязнение Cu оказалось наиболее токсичное влияние; в варианте Cu 500 мг/кг значение активности уреазы в 4 раза ниже по сравнению с контролем. Темногумусовая почва относительно богата Cu, на этом фоне экотоксикологический эффект, по-видимому, оказался усиленным.

Загрязнение свинцом оказалось наименее опасным на обеих почвах, что соответствует данным по пониженному влиянию этого металла на активность уреазы (Chaperon, Sauve, 2008).



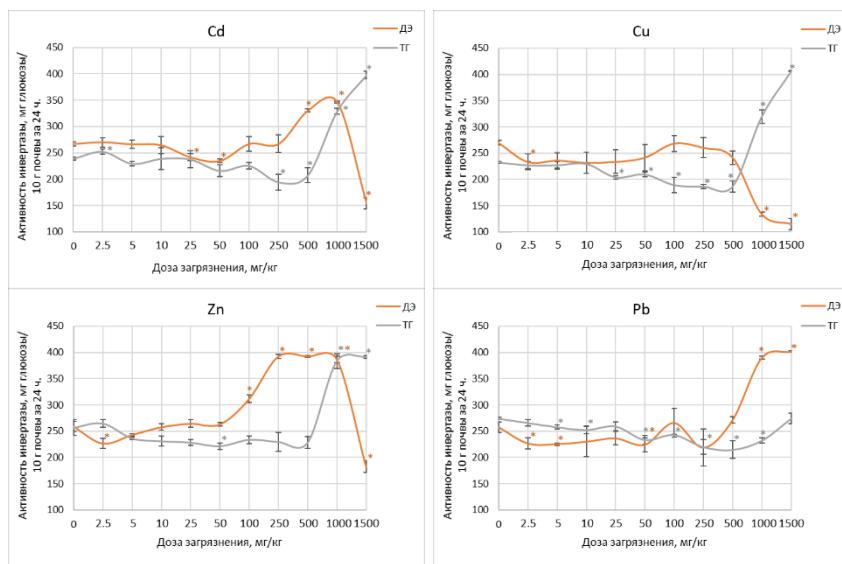
**Рис. 2.** Активность уреазы в зависимости от дозы загрязнения, мг N-NH<sub>4</sub>/10 г почвы за 24 ч.

**Fig. 2.** Urease activity depending on the degree of contamination, mg N-NH<sub>4</sub>/10 g of soil in 24 hours.

Инвертаза является гидролитическим ферментом, участвующий в биохимических превращениях углерода в почве. Она расщепляет сахарозу, обеспечивая поступление в почву растворимых низкомолекулярных сахаров, глюкозы и фруктозы, которые служат источником питания и энергии для микроорганизмов (Зягинцев, 1978; Frankeberger, Johanson, 1983).

Малые дозы загрязнения исследуемых почв металлами не значительно влияли на активность инвертазы (рис. 3). Относительная устойчивость показателя в дерново-элювоземе проявилась в интервале загрязнения Cd 2.5–250 мг/кг; Cu – 2.5–500 мг/кг; Zn –

2.5–50 мг/кг; Pb – 2.5–250 мг/кг. В темногумусовой почве отмечено постепенное снижение активности инвертазы при внесении всех металлов в дозе от 2.5 до 500 мг/кг.



**Рис. 3.** Активность инвертазы в зависимости от дозы загрязнения, мг глюкозы/10 г почвы за 24 ч.

**Fig. 3.** Invertase activity depending on the degree of contamination, mg glucose/10 g of soil in 24 hours.

Отличительной особенностью инвертазы являлся повторный рост ее активности в вариантах с высоким загрязнением почв. В дерново-элюзовоземе наблюдали усиление активности инвертазы на фоне всех металлов, кроме Cu. Это явление отмечено при дозах внесения Cd 500 и 1000 мг/кг, Zn – от 250 до 1000 мг/кг, Pb – от 1000 мг/кг и выше. При наибольшей нагрузке на почву (1500 мг/кг) установлен резкий экотоксикологический эффект; при этом в варианте с Cd активность инвертазы ниже контрольного уровня в 1.7 раз, в варианте с Cu – в 2.3 раза, в варианте с Zn – 1.4 раза. Снижение активности инвертазы на 40% зарегистрировано при загрязнении Cd почв Индии в концентрации 1000 мг/кг (Verma et

al., 2010). В дерново-подзолистой почве также наблюдалось снижение активности инвертазы при загрязнении Cu (Минеев и др., 2008). Высокие значения загрязнения Cd, Pb и Zn на юге Польши снизило активность инвертазы в почве (Ciarkowska et al., 2014).

В темногумусовой почве экотоксикологический эффект загрязнения на активности инвертазы не проявился. Активность фермента, напротив, увеличилась при внесении Cd, Cu и Zn примерно в 1.5 раза, а на фоне Pb даже при максимальном загрязнении активность инвертазы осталась на уровне контроля. В почвах с высоким фоновым содержанием Cd также не обнаружили существенного влияния металла на активность инвертазы (Liu et al., 2024).

## ВЫВОДЫ

Биологически активные поверхностные горизонты темногумусовой почвы характеризуются повышенным содержанием гумуса, менее кислой реакцией почвенной среды и большей емкостью поглощения по сравнению с поверхностными горизонтами дерново-элювозема. В темногумусовой почве фоновые показатели содержания Cu, Zn, Cd выше, чем в дерново-элювоземе. Генетические свойства темногумусовой почвы определили ее повышенную устойчивость к загрязнению ТМ, выраженную в биохимических реакциях, а именно: в активности каталазы, уреазы и инвертазы.

Активность уреазы оказалась наиболее чувствительным показателем загрязнения ТМ обеих почв; она снизилась в дерново-элювоземе при внесении Cd и Cu в количестве от 100 мг/кг и выше, в темногумусовой почве – при внесении Cd от 100 мг/кг и выше, а Cu – от 1000 мг/кг и выше. Негативное воздействие Pb проявилось только в темногумусовой почве, где активность уреазы понижалась при загрязнении от 250 мг/кг и выше. Устойчивую активность фермента наблюдали при загрязнении почв Zn, снижение показателя отметили лишь при максимальном загрязнении (1500 мг/кг).

Особенность изменений каталазной и инвертазной активности в ответ на загрязнение металлами обеих почв проявилась в том, что после некоторого понижения активности часто наблюдали усиление активности этих ферментов в вариантах с повышен-

ным загрязнением, по-видимому, обусловленное выработкой устойчивости микроорганизмов.

При анализе сравнительной токсичности металлов установлено, что Cu, несмотря на свое биогенное значение, отличалась усиленным экотоксикологическим эффектом по сравнению с Zn и Cd. Наименьшее воздействие на активность ферментов оказало загрязнение почв Pb.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аладьева Т.Л., Зиматкин С.М. Катализ клетки: строение, биогенез, многообразие, функции // Экспериментальная биология и биотехнология. 2022. № 1. С. 12–22.
2. Водяницкий Ю.Н. Тяжелые и сверхтяжелые металлы и металлоиды в загрязненных почвах. М.: ГНУ Почвенный институт им. В.В. Докучаева Россельхозакадемии, 2009. 96 с.
3. Водяницкий Ю.Н., Ладонин Д.В., Савичев А.Т. Загрязнение почв тяжелыми металлами. М., 2012. 304 с.
4. Даденко Е.В., Мясникова М.А., Чернокалова Е.В., Казеев К.Ш., Колесников С.И. Сезонная динамика ферментативной активности чернозема обыкновенного // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 6. С. 743.
5. Еремченко О.З., Шестаков И.Е., Москвина Н.В. Почвы и техногенные поверхностные образования урбанизированных территорий Пермского Прикамья. Пермь: Изд-во Перм. гос. нац. исслед. ун-та, 2016. 252 с.
6. Звягинцев Д.Г. Биологическая активность почв и шкалы для оценки некоторых ее показателей // Почвоведение. 1978. № 6. С. 48–54.
7. Ильин В.Б. Тяжелые металлы в системе почва – растение. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012. 220 с.
8. Копчик Г.Н. Устойчивость лесных почв к атмосферному загрязнению // Лесоведение. 2004. № 4. С. 61–71.
9. Копчик С.В., Копчик Г.Н. Оценка современных рисков избыточного накопления тяжелых металлов в почвах на основе концепции критических нагрузок (обзор) // Почвоведение. 2022. № 5. С. 615–630. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0032180X22050033>.
10. Минеев В.Г., Лебедева Л.А., Арзамазова А.В. Последействие различных систем удобрения на ферментативную активность дерново-подзолистой почвы при загрязнении тяжелыми металлами // Агрохимия. 2008. № 10. С. 48–54.
11. Новоселова Е.И. Ферментативная активность почв в условиях

- нефтяного загрязнения и ее биодиагностическое значение // Теоретическая и прикладная экология. 2009. № 2. С. 4–12.
12. Об утверждении Порядка и мер охраны редких и находящихся под угрозой исчезновения почв, занесенных в Красную книгу почв Пермского края, перечня редких и находящихся под угрозой исчезновения почв, занесенных в Красную книгу почв Пермского края: Постановление Правительства Пермского края № 447-п (утв. Губернатором Пермского края 27.05.2022).
13. Об утверждении санитарных правил и норм СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания: Постановление главного государственного санитарного врача РФ (утв. 28.01.2021).
14. Поляк Ю.М., Сухаревич В.И. Почвенные ферменты и загрязнение почв: биодеградация, биоремедиация, биоиндикация // Агрохимия. 2020. № 3. С. 83–93. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002188120010123>.
15. Сайранова П.Ш., Еремченко О.З. Свойства псаммоzemов камских надпойменных террас и оценка их устойчивости к загрязнению Cu и Cd // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2024. Вып. 119. С. 66–97. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2024-119-66-97>.
16. Трифонова Т.А., Забелина О.Н. Изменение биологической активности почвы городских рекреационных территорий в условиях загрязнения тяжелыми металлами и нефтепродуктами // Почвоведение. 2017. № 4. С. 497–505.
17. Ушакова Е.С., Пузик А.Ю., Караваева Т.И. Оценка микроэлементного состава снежного покрова Березниковского городского округа (Пермский край) // Географический вестник. 2020. № 2 (53). С. 130–140. DOI: <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2020-2-130-140>.
18. Хазиев Ф.Х. Методы почвенной энзимологии. М.: Наука, 2005. 252 с.
19. Хазиев Ф.Х. Экологические связи ферментативной активности почв // Экбиотех. 2018. Т. 1. № 2. С. 80–92.
20. Чупахина Г.Н., Масленников П.В., Скрыпник Л.Н., Бессережнова М.И. Реакция пигментной и антиоксидантной систем растений на загрязнение окружающей среды г. Калининграда выбросами автотранспорта // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2012. № 2 (18). С. 171–185.
21. Швакова Э.В. Изменение активности уреазы при повышенных содержаниях тяжелых металлов (Pb, Zn, Cu) в почве // Arctic Environmental Research. 2013. № 2. С. 61–66.
22. Щербакова Т.А. Ферментативная активность почв и трансформация органического вещества. Минск, 1983. 222 с.

23. *Bacmaga M., Boros E., Kucharski J., Wyżkowska J.* Enzymatic activity in soil contaminated with the Aurora 40 Wg herbicide // Environment Protection Engineering. 2012. Vol. 38 (1). P. 91–102. DOI: <https://doi.org/10.1080/10934529.2012.630305>.
24. *Bastida F., Moreno J., Hernandez T., García C.* Microbiological activity in a soil 15 years after its devegetation // Soil Biology and Biochemistry. 2006. Vol. 38 (8). P. 2503–2507. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2006.02.022>.
25. *Blagodatskaya E., Kuzyakov Y.* Active microorganisms in soil: Critical review of estimation criteria and approaches // Soil Biology and Biochemistry. 2013. Vol. 67. P. 192–211. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.08.024>.
26. *Burns R.G., DeForest J.L., Marxsen J., Sinsabaugh R.L., Stromberger M.E., Wallenstein M.D., Weintraub M.N., Zoppini A.* Soil enzymes in a changing environment: Current knowledge and future directions // Soil Biology and Biochemistry. 2013. Vol. 58. P. 216–234. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.11.009>.
27. *Calamai L., Lozzi I., Stotzky G., Fusi P., Ristori G.G.* Interaction of catalase with montmorillonite homoionic to cations with different hydrophobicity: effect on enzymatic activity and microbial utilization // Soil Biology and Biochemistry. 2000. Vol. 32 (6). P. 815–823. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(99\)00211-4](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(99)00211-4).
28. *Chaperon S., Sauve S.* Toxicity interactions of cadmium, copper, and lead on soil urease and dehydrogenase activity in relation to chemical speciation // Ecotoxicology and Environmental Safety. 2008. Vol. 70. P. 1–9. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2007.10.026>.
29. *Ciarkowska K., Solek-Podwika K., Wieczorek J.* Enzyme activity as an indicator of soil-rehabilitation processes at a zinc and lead ore mining and processing area // Journal of Environmental Management. 2014. Vol. 132. P. 250–256. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.10.022>.
30. *Frankeberger W.T., Johanson J.B.* Method of measuring invertase activity in soils // Plant and soil. 1983. Vol. 74. P. 301–311.
31. *Gianfreda L., Rao M.A.* The influence of pesticides on soil enzymes // Soil Enzymology. Soil Biology Series. No. 22. 2010. P. 293–312. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-642-14225-3\\_16](https://doi.org/10.1007/978-3-642-14225-3_16).
32. *Gianfreda L., Ruggiero P.* Enzyme activities in soil P. Nannipieri, K. Smalla // Nucleic Acids and Proteins in Soil. 2006. P. 257–297. DOI: [https://doi.org/10.1007/3-540-29449-X\\_12](https://doi.org/10.1007/3-540-29449-X_12).
33. *Hale B., Gopalapillai Y., Pellegrino A., Jennett T., Kikkert J., Lau W., Schlekat C., McLaughlin M.J.* Validation of site-specific soil Ni toxicity thresholds with independent ecotoxicity and biogeochemistry data for elevated soil Ni // Environ. Pollut. 2017. Vol. 231. P. 165–172. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.09.030>.

<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.08.008>.

34. Heavy metals in soils: trace metals and metalloids in soils and their bioavailability / ed. Alloway B.J.N.Y., Springer Science + Business Media Dordrecht, 2013. 613 p. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-94-007-4470-7\\_8](https://doi.org/10.1007/978-94-007-4470-7_8).
35. Jian S., Li J., Chen J., Wang G., Mayes M.A., Dzantor K.E., Hui D., Luo Y. Soil extracellular enzyme activities, soil carbon and nitrogen storage under nitrogen fertilization: a meta-analysis // Soil Biol. Biochem. 2016. Vol. 101. P. 32–43. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.07.003>.
36. Kiruba N.J.M., Thatheyus A.J. Chapter 18 – Fungi, fungal enzymes and their potential application as biostimulants / Editor(s): White J., Kumar A., Droby S. // Microbiome Stimulants for Crops, Woodhead Publishing, 2021. P. 305–314. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822122-8.00024-8>.
37. Kocak B. Importance of urease activity in soil // V International Scientific and Vocational Studies Congress – Science and Health. 2020. P. 51–60.
38. Liu J., Li X., Zhu Q., Zhou J., Shi L., Lu W., Bao L., Meng L., Wu L., Zhang N., Christie P. Differences in the activities of six soil enzymes in response to cadmium contamination of paddy soils in high geological background areas // Environmental Pollution. 2024. Vol. 346. P. 123704. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.123704>.
39. Ma B., Wang J., Zhang L. Two cadmium-resistant strains of agricultural soil effective in remediating soil cadmium pollution // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2023. Vol. 11. P. 111189. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.111189>.
40. Mahaseth T., Kuzminov A. Potentiation of hydrogen peroxide toxicity: from catalase inhibition to stable DNA-iron complexes. Mutation Research // Reviews in Mutation Research. 2017. Vol. 773. P. 274–281. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mrrev.2016.08.006>.
41. Paz-Ferreiro J., Fu S. Biological indices for soil quality evaluation: perspectives and limitations // Land Degrad. Dev. 2016. Vol. 27. P. 14–25. DOI: <https://doi.org/10.1002/ldr.2262>.
42. Rao M.A., Scelza R., Acevedo F., Diez M.C., Gianfreda L. Enzymes as useful tools for environmental purposes // Chemosphere. 2014. Vol. 107. P. 145–162. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.12.059>.
43. Rutigliano F., Castaldi S., Ascoli R., Papa S., Carfora A., Marzaioli R., Fioretto A. Soil activities related to nitrogen cycle under three plant cover types in Mediterranean environment Appl // Soil Ecol. 2009. Vol. 43 (1). P. 40–46. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2009.05.010>.
44. Steinweg J.M., Dukes J.S., Paul E.A., Wallenstein M.D. Microbial responses to multi-factor climate change: effects on soil enzymes // Front. Microbiol. 2013. Vol. 4. P. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2013.00146>.

45. Utobo E.B., Tewari L. Soil enzymes as bioindicators of soil ecosystem status // Applied Ecology and Environmental Research. 2015. Vol. 13 (1). P. 147–169. DOI: [https://doi.org/10.15666/aeer/1301\\_147169](https://doi.org/10.15666/aeer/1301_147169).
46. Verma R.K., Yadav D.V., Singh C.P., Archna S., Asha G. Effects of heavy metals on soil invertase enzyme activity in different soil types // Land Contamination & Reclamation. 2010. Vol. 18 (2). P. 175–180. DOI: <https://doi.org/10.2462/09670513.941>.
47. Waalewijn-Kool P.L., Rupp S., Loftus S., Svendsen C., van Gestel C.A.M. Effect of soil organic matter content and pH on the toxicity of ZnO nanoparticles to *Folsomia candida* // Ecotoxicol. Environ. Saf. 2014. Vol. 108. P. 9–15. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2014.06.031>.
48. Yan J., Quan G., Ding C. Effects of the combined pollution of lead and cadmium on soil urease activity and nitrification // Procedia Environmental Sciences. 2013. Vol. 18. P. 78–83. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2013.04.011>.
49. You L., Zhang R., Dai J., Lin Z., Li Y., Herzberg M., Zhang J., Al-Wathnani H., Zhang C., Feng R., Liu H., Rensing C. Potential of cadmium resistant *Burkholderia contaminans* strain ZCC in promoting growth of soy beans in the presence of cadmium // Ecotoxicology and Environmental Safety. 2021. Vol. 211. P. 111914. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.111914>.
50. Zhang Q., Zhu L., Wang J., Xie H., Wang J., Wang F., Sun F. Effects of fomesafen on soil enzyme activity, microbial population, and bacterial community composition // Environ. Monit. Assess. 2014. Vol. 186. P. 2801–2812. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-013-3581-9>.
51. Zhang W., Huang Z., He L., Sheng X. Assessment of bacterial communities and characterization of lead-resistant bacteria in the rhizosphere soils of metal-tolerant *Chenopodium ambrosioides* grown on lead-zinc mine tailings // Chemosphere. 2012. Vol. 87. P. 1171–1178. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.02.036>.

## REFERENCES

1. Alad'eva T.L., Zimatkin S.M., *Katalaza kletki: stroenie, biogenez, mnogoobrazie, funktsii* (Cell catalase: structure, biogenesis, diversity, functions), *Eksperimental'naya biologiya i biotekhnologiya*, 2022, No. 1, pp. 12–22.
2. Vodyanitskii Yu.N., *Tyazhelye i sverkhtyazhelye metally i metalloidy v zagryaznennykh pochvakh* (Heavy and superheavy metals and metalloids in contaminated soils), Moscow: GNU Pochvennyi institut im. V.V. Dokuchaeva Rossel'khozakademii, 2009, 96 p.

3. Vodyanitskii Yu.N., Ladonin D.V., Savichev A.T., *Zagryaznenie pochv tyazhelymi metallami* (Soil pollution with heavy metals), Moscow, 2012, 304 p.
4. Dadenko E.V., Myasnikova M.A., Chernokalova E.V., Kazeev K.Sh., Kolesnikov S.I., Sezonnaya dinamika fermentativnoi aktivnosti chernozema obyknovenного (Seasonal dynamics of enzymatic activity of ordinary chernozem), *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*, 2013, No. 6, p. 743.
5. Eremchenko O.Z., Shestakov I.E., Moskvina N.V., *Pochvy i tekhnogennye poverkhnostnye obrazovaniya urbanizirovannykh territorii Permskogo Prikam'ya* (Soils and technogenic surface formations of urbanized territories of the Perm Kama region), Perm: Izd-vo Perm. gos. nats. issled. un-t, 2016, 252 p.
6. Zvyagintsev D.G., Biologicheskaya aktivnost' pochv i shkaly dlya otsenki nekotorykh ee pokazatelei (Biological activity of soils and scales for assessing some of its indicators), *Pochvovedenie*, 1978, No. 6, pp. 48–54.
7. Il'in V.B., *Tyazhelye metally v sisteme pochva – rastenie* (Heavy metals in the soil – plant system), Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2012, 220 p.
8. Koptsik G.N., Ustoichivost' lesnykh pochv k atmosfernomu zagryazneniyu (Resistance of forest soils to atmospheric pollution), *Lesovedenie*, 2004, No. 4, pp. 61–71.
9. Koptsik S.V., Koptsik G.N., Otsenka sovremennoykh riskov izbytochnogo nakopleniya tyazhelykh metallov v pochvakh na osnove kontseptsii kriticheskikh nagruzok (obzor) (Assessment of modern risks of excessive accumulation of heavy metals in soils based on the concept of critical loads (review)), *Pochvovedenie*, 2022, No. 5, pp. 615–630, DOI: <https://doi.org/10.31857/S0032180X22050033>.
10. Mineev V.G., Lebedeva L.A., Arzamazova A.V., Posledeistvie razlichnykh sistem udobreniya na fermentativnuyu aktivnost' dernovo-podzolistoi pochvy pri zagryaznenii tyazhelymi metallami (Aftereffect of various fertilizer systems on the enzymatic activity of soddy-podzolic soil when polluted with heavy metals), *Agrokhimiya*, 2008, No. 10, pp. 48–54.
11. Novoselova E.I., Fermentativnaya aktivnost' pochv v usloviyah neftyanogo zagryazneniya i ee biodiagnosticheskoe znachenie (Enzymatic activity of soils under conditions of oil pollution and its bidiagnostic significance), *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*, 2009, No. 2, pp. 4–12.
12. Procedure and measures for the protection of rare and endangered soils listed in the Red Book of Soils of the Perm Territory, the list of rare and endangered soils listed in the Red Book of Soils of the Perm Territory: Resolution of the Government of the Perm Territory No. 447-p, 27.05.2022.
13. Resolution of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation,

28.01.2021, No. SanPiN 1.2.3685-21.

14. Polyak Yu.M., Sukharevich V.I., Pochvennye fermenty i zagryaznenie pochv: biodegradatsiya, bioremediatsiya, bioindikatsiya (Soil enzymes and soil pollution: biodegradation, bioremediation, bioindication), *Agrokhimiya*, 2020, No. 3, pp. 83–93, DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002188120010123>.
15. Sairanova P.Sh., Eremchenko O.Z., Properties of psammozems of the Kama terraces above the floodplain and assessment of their sustainability to pollution by Cu and Cd, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2024, Vol. 119, pp. 66–97, DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2024-119-66-97>.
16. Trifonova T.A., Zabelina O.N., Izmenenie biologicheskoi aktivnosti pochvy gorodskikh rekreatsionnykh territorii v usloviyakh zagryazneniya tyazhelymi metallami i nefteproduktami (Changes in the biological activity of soil in urban recreational areas under conditions of pollution with heavy metals and petroleum products), *Pochvovedenie*, 2017, No. 4, pp. 497–505.
17. Ushakova E.S., Puzik A.Yu., Karavaeva T.I., Otsenka mikroelementnogo sostava snezhnogo pokrova Bereznikovskogo gorodskogo okruga (Permskii krai) (Assessment of the microelement composition of the snow cover of the Berezniki urban district (Perm Krai)), *Geograficheskii vestnik*, 2020, No. 2 (53), pp. 130–140, DOI: <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2020-2-130-140>.
18. Khaziev F.Kh., *Metody pochvennoi enzimologii* (Methods of soil enzymology), Moscow: Nauka, 2005, 252 p.
19. Khaziev F.Kh., Ekologicheskie syazi fermentativnoi aktivnosti pochv (Ecological connections of soil enzymatic activity), *Ekobiotekh*, 2018, Vol. 1, No. 2, pp. 80–92.
20. Chupakhina G.N., Maslennikov P.V., Skrypnik L.N., Besserezhnova M.I., Reaktsiya pigmentnoi i antioksidantnoi sistem rastenii na zagryaznenie okruzhayushchey sredy g. Kaliningrada vybrosami avtotransporta (Response of the pigment and antioxidant systems of plants to environmental pollution in Kaliningrad by vehicle emissions), *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta, Biologiya*, 2012, No. 2 (18), pp. 171–185.
21. Shvakova E.V., Izmenenie aktivnosti ureazy pri povyshennykh soderzhaniyakh tyazhelykh metallov (Pb, Zn, Cu) v pochve (Changes in urease activity at elevated levels of heavy metals (Pb, Zn, Cu) in the soil), *Arctic Environmental Research*, 2013, No. 2, pp. 61–66.
22. Shcherbakova T.A., *Fermentativnaya aktivnost' pochv i transformatsiya organicheskogo veshchestva* (Enzymatic activity of soils and transformation of organic matter), Minsk, 1983, 222 p.
23. Bacmaga M., Boros E., Kucharski J., Wyzkowska J., Enzymatic activity in soil contaminated with the Aurora 40 Wg herbicide, *Environment Protection Engineering*, 2012, Vol. 38 (1), pp. 91–102, DOI: <https://doi.org/10.1080/10934529.2012.630305>.

24. Bastida F., Moreno J., Hernandez T., García C., Microbiological activity in a soil 15 years after its devegetation, *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, Vol. 38 (8), pp. 2503–2507, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2006.02.022>.
25. Blagodatskaya E., Kuzyakov Y., Active microorganisms in soil: Critical review of estimation criteria and approaches, *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, Vol. 67, pp. 192–211, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.08.024>.
26. Burns R.G., DeForest J.L., Marxsen J., Sinsabaugh R.L., Stromberger M.E., Wallenstein M.D., Weintraub M.N., Zoppini A., Soil enzymes in a changing environment: Current knowledge and future directions, *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, Vol. 58, pp. 216–234, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.11.009>.
27. Calamai L., Lozzi I., Stotzky G., Fusi P., Ristori G.G., Interaction of catalase with montmorillonite homoionic to cations with different hydrophobicity: effect on enzymatic activity and microbial utilization, *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, Vol. 32 (6), pp. 815–823, DOI: [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(99\)00211-4](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(99)00211-4).
28. Chaperon S., Sauve S., Toxicity interactions of cadmium, copper, and lead on soil urease and dehydrogenase activity in relation to chemical speciation, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2008, Vol. 70, pp. 1–9, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2007.10.026>.
29. Ciarkowska K., Solek-Podwika K., Wieczorek J., Enzyme activity as an indicator of soil-rehabilitation processes at a zinc and lead ore mining and processing area, *Journal of Environmental Management*, 2014, Vol. 132, pp. 250–256, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.10.022>.
30. Frankeberger W.T., Johanson J.B., Method of measuring invertase activity in soils, *Plant and soil*, 1983, Vol. 74, pp. 301–311.
31. Gianfreda L., Rao M.A., The influence of pesticides on soil enzymes, *Soil Enzymology*, Soil Biology Series, 2010, No. 22, pp. 293–312, DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-642-14225-3\\_16](https://doi.org/10.1007/978-3-642-14225-3_16).
32. Gianfreda L., Ruggiero P., Enzyme activities in soil P. Nannipieri, K. Smalla, *Nucleic Acids and Proteins in Soil*, 2006, pp. 257–297, DOI: [https://doi.org/10.1007/3-540-29449-X\\_12](https://doi.org/10.1007/3-540-29449-X_12).
33. Hale B., Gopalapillai Y., Pellegrino A., Jennett T., Kikkert J., Lau W., Schlekat C., McLaughlin M.J., Validation of site-specific soil Ni toxicity thresholds with independent ecotoxicity and biogeochemistry data for elevated soil Ni, *Environ. Pollut.*, 2017, Vol. 231, pp. 165–172, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.08.008>.
34. Heavy metals in soils: trace metals and metalloids in soils and their bioavailability, Ed. Alloway B.J. N.Y., Springer Science + Business Media

- Dordrecht, 2013, 613 p., DOI: [https://doi.org/10.1007/978-94-007-4470-7\\_8](https://doi.org/10.1007/978-94-007-4470-7_8).
35. Jian S., Li J., Chen J., Wang G., Mayes M.A., Dzantor K.E., Hui D., Luo Y., Soil extracellular enzyme activities, soil carbon and nitrogen storage under nitrogen fertilization: a meta-analysis, *Soil Biol. Biochem.*, 2016, Vol. 101, pp. 32–43, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.07.003>.
36. Kiruba N.J.M., Thatheyus A.J., Chapter 18 – Fungi, fungal enzymes and their potential application as biostimulants, In: Editor(s): White J., Kumar A., Droby S., *Microbiome Stimulants for Crops*, Woodhead Publishing, 2021, pp. 305–314, DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822122-8.00024-8>.
37. Kocak B., Importance of urease activity in soil, *V International Scientific and Vocational Studies Congress – Science and Health*, 2020, pp. 51–60.
38. Liu J., Niu J., Yin L., Jiang F., In situ encapsulation of laccase in nanofibers by electrospinning for development of enzyme biosensors for chlorophenol monitoring, *Analyst*, 2011, Vol. 136, pp. 4802–4808.
39. Ma B., Wang J., Zhang L., Two cadmium-resistant strains of agricultural soil effective in remediating soil cadmium pollution, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2023, Vol. 11, pp. 111189, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.111189>.
40. Mahaseth T., Kuzminov A., Potentiation of hydrogen peroxide toxicity: from catalase inhibition to stable DNA-iron complexes, *Mutation Research. Reviews in Mutation Research*, 2017, Vol. 773, pp. 274–281, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mrrev.2016.08.006>.
41. Paz-Ferreiro J., Fu S., Biological indices for soil quality evaluation: perspectives and limitations, *Land Degrad. Dev.*, 2016, Vol. 27, pp. 14–25, DOI: <https://doi.org/10.1002/ldr.2262>.
42. Rao M.A., Scelza R., Acevedo F., Diez M.C., Gianfreda L., Enzymes as useful tools for environmental purposes, *Chemosphere*, 2014, Vol. 107, pp. 145–162.
43. Rutigliano F., Castaldi S., Ascoli R., Papa S., Carfora A., Marzaioli R., Fioretto A., Soil activities related to nitrogen cycle under three plant cover types in Mediterranean environment Appl., *Soil Ecol.*, 2009, Vol. 43 (1), pp. 40–46, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2009.05.010>.
44. Steinweg J.M., Dukes J.S., Paul E.A., Wallenstein M.D., Microbial responses to multi-factor climate change: effects on soil enzymes, *Front. Microbiol.*, 2013, Vol. 4, pp. 1–11, DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2013.00146>.
45. Utobo E.B., Tewari L., Soil enzymes as bioindicators of soil ecosystem status, *Applied Ecology and Environmental Research*, 2015, Vol. 13 (1), pp. 147–169, DOI: [https://doi.org/10.15666/aeer/1301\\_147169](https://doi.org/10.15666/aeer/1301_147169).
46. Verma R.K., Yadav D.V., Singh C.P., Archna S., Asha G., Effects of heavy metals on soil invertase enzyme activity in different soil types, *Land*

*Contamination & Reclamation*, 2010, Vol. 18 (2), pp. 175–180.

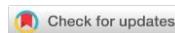
47. Waalewijn-Kool P.L., Rupp S., Lofts S., Svendsen C., van Gestel C.A.M., Effect of soil organic matter content and pH on the toxicity of ZnO nanoparticles to *Folsomia candida*, *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, 2014, Vol. 108, pp. 9–15, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2014.06.031>.

48. Yan J., Quan G., Ding C., Effects of the Combined Pollution of Lead and Cadmium on Soil Urease Activity and Nitrification, *Procedia Environmental Sciences*, 2013, Vol. 18, pp. 78–83, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2013.04.011>.

49. You L., Zhang R., Dai J., Lin Z., Li Y., Herzberg M., Zhang J., Al-Wathnani H., Zhang C., Feng R., Liu H., Rensing C., Potential of cadmium resistant *Burkholderia contaminans* strain ZCC in promoting growth of soy beans in the presence of cadmium, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, Vol. 211, pp. 111914, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.111914>.

50. Zhang Q., Zhu L., Wang J., Xie H., Wang J., Wang F., Sun F., Effects of fomesafen on soil enzyme activity, microbial population, and bacterial community composition, *Environ. Monit. Assess.*, 2014, Vol. 186, pp. 2801–2812, DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-013-3581-9>.

51. Zhang W., Huang Z., He L., Sheng X., Assessment of bacterial communities and characterization of lead-resistant bacteria in the rhizosphere soils of metal-tolerant *Chenopodium ambrosioides* grown on lead-zinc mine tailings, *Chemosphere*, 2012, Vol. 87, pp. 1171–1178, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.02.036>.



### Ссылки для цитирования:

Дрягина А.А., Пономарев К.О., Кремлева Т.А., Елина Е.И., Шулаев Н.А., Хайнак Л.М. Влияние высокопористых биоуглей на свойства тепличных торфяных субстратов // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2025. Вып. 126. С. 230-269. DOI: 10.19047/0136-1694-2025-126-230-269

### Cite this article as:

Dryagina A.A., Ponomarev K.O., Kremleva T.A., Elina E.I., Shulaev N.A., Khainak L.M., The effect of highly porous biochar on the properties of greenhouse peat substrates, Dokuchaev Soil Bulletin, 2025, V. 126, pp. 230-269, DOI: 10.19047/0136-1694-2025-126-230-269

### Благодарность:

Комплексные исследования характеристик биоуглей проведены в рамках Госзадания № FEWZ-2024-0013 (Научно-технические основы и прикладные решения ресурсоэффективной термической переработки органического сырья с получением продуктов с высокой добавленной стоимостью для энергетической, metallurgической и сельскохозяйственной отраслей). Исследование макро- и микроэлементного состава торфяных субстратов выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках проекта № 23-76-01011 “Разработка высокопродуктивного субстрата с использованием биоугольных мелиорантов из термически переработанного органического сырья для выращивания микрозелени и овощной низкорослой продукции” (<https://rscf.ru/project/23-76-01011/>). Авторы искренне выражают благодарность Центру коллективного пользования “Рациональное природопользование и физико-химические исследования” Тюменского государственного университета за неоценимую поддержку в проведении аналитических исследований.

### Acknowledgments:

Comprehensive studies of biochar characteristics were carried out under State assignment No. FEWZ-2024-0013 (Scientific and technical foundations and applied solutions for resource-efficient thermal processing of organic raw materials to produce high value-added products for the energy, metallurgical and agricultural industries). The research of macro- and microelement composition of peat substrates was financially supported by the Russian Science Foundation under Project No. 23-76-01011 “Development of a high-yield substrate using biochar ameliorants from thermally processed organic raw materials for growing microgreens and low-growth vegetable products”

(<https://rscf.ru/project/23-76-01011/>). The authors sincerely express their gratitude to the Research Resource Center “Rational Nature Management and Physico-Chemical Research” of the Tyumen State University for invaluable support in carrying out analytical studies.

## Влияние высокопористых биоуглей на свойства тепличных торфяных субстратов

© 2025 г. А. А. Дрягина, К. О. Пономарев\*, Т. А. Кремлева,  
Е. И. Елина, Н. А. Шулаев, Л. М. Хайнак

Тюменский государственный университет, Россия,  
625003, Тюмень, ул. Володарского, 6,

\*<https://orcid.org/0000-0003-4877-1536>, e-mail: [k.o.ponomarev@utmn.ru](mailto:k.o.ponomarev@utmn.ru).

Поступила в редакцию 04.03.2025, после доработки 04.04.2025,  
принята к публикации 13.11.2025

**Резюме:** Торф является ключевым компонентом субстратов в тепличном хозяйстве, и улучшение его свойств за счет добавления органических компонентов является распространенной практикой. В этом исследовании сравниваются высокопористые биоугли из скорлупы кедровых орехов, полученные в условиях медленного пиролиза и при высокой температуре с последующей активацией, в качестве добавок, частично заменяющих торф в субстратах. Установлено содержание углерода и степень разложения органического вещества в торфяных смесях с биоуглями различных концентраций (10% и 20% об.) и форм (измельченная и неизмельченная). Установлено, что 20% измельченного биоугля приводят к наибольшему росту соотношения С/N, что обычно наблюдается в неосущенных или более глубоких слоях торфа, указывая на большую интенсивность гумификации, наилучшим образом стимулируя микробную активность, но свидетельствуя о возможном снижении доступности азота для растений. Определены концентрации макро- и микроэлементов в смесевых торфяных субстратах. Результаты показали, что внесение измельченного активированного биоугля (10–20% об.) в торф значительно увеличивает в субстрате концентрацию ключевых макроэлементов, таких как фосфор, калий и кальций в 4.9–5.9, 3.3–3.9, 1.7–1.8 раза соответственно, что свидетельствует о перспективности активированного биоугля для улучшения питательных свойств торфяных субстратов. Особое внимание уделено анализу влияния биоуглей на содержание тяжелых металлов и неметаллов, который подтвердил потенциальную эффективность и экологическую

безопасность их использования. Полученные данные свидетельствуют о возможности частичной замены торфа высокопористыми биоуглями, особенно в измельченной форме, что может способствовать повышению урожайности и устойчивости растений к стрессовым условиям.

**Ключевые слова:** активированный биоуголь; пористость; сорбционная способность; элементный состав субстрата; тяжелые металлы; экологическая безопасность.

## The effect of highly porous biochar on the properties of greenhouse peat substrates

© 2025 A. A. Dryagina, K. O. Ponomarev\*, T. A. Kremleva,  
E. I. Elina, N. A. Shulaev, L. M. Khainak

*University of Tyumen,*

*6 Volodarskogo Str., Tyumen 625003, Russian Federation,*

\*<https://orcid.org/0000-0003-4877-1536>, e-mail: [k.o.ponomarev@utmn.ru](mailto:k.o.ponomarev@utmn.ru).

*Received 04.03.2025, Revised 04.04.2025, Accepted 13.11.2025*

**Abstract:** Peat is a key component of substrates in greenhouse cultivation, and enhancing its properties through the addition of organic components is a common practice. This study compares highly porous biochars derived from pine nut shells, produced under slow pyrolysis and high-temperature conditions with subsequent activation, as additives partially replacing peat in substrates. The carbon content and degree of organic matter decomposition were determined in peat mixtures with biochars of different concentrations (10% and 20% by volume) and forms (ground and unground). It was found that 20% ground biochar leads to the greatest increase in the C/N ratio, typically observed in undrained or deeper peat layers, indicating a higher intensity of humification that optimally stimulates microbial activity, yet suggesting a possible reduction in nitrogen availability for plants. The concentrations of macro- and micronutrients in mixed peat substrates were determined. The results showed that the addition of ground activated biochar (10–20% by volume) significantly increases the concentration of key macronutrients in the substrate, such as phosphorus, potassium, and calcium by factors of 4.9–5.9, 3.3–3.9, and 1.7–1.8, respectively, demonstrating the promising potential of activated biochar for improving the nutrient properties of peat substrates. Particular attention was paid to analyzing the impact of biochars on the content of heavy metals and non-metals, confirming their potential effectiveness and environmental safety. The data obtained suggest the possibility of partially replacing peat with highly porous biochars,

especially in ground form, which may contribute to increased crop yields and enhanced plant resistance to stress conditions.

**Keywords:** activated biochar; porosity; sorption capacity; elemental composition of substrate; heavy metals; environmental safety.

## ВВЕДЕНИЕ

Торфяники являются важнейшими поглотителями углерода в наземных экосистемах, занимая площадь более 3 млн км<sup>2</sup> северного полушария (Beaulne et al., 2021; Тимофеева и др., 2024). Направление добычи торфа, его использования и переработки постоянно развивается, регулярно рассматривается и поддерживается в различных регионах России, в том числе совместно с предприятиями, расположеннымными за ее пределами (В Тюмени..., 2024; Яконовская, 2024). Торф является одним из традиционно используемых субстратов в сельскохозяйственных и городских теплицах для выращивания растений. Но в то же время он является невозобновляемым ресурсом из-за очень длительного времени его регенерации и трудозатратным видом сырья с точки зрения его добычи и транспортировки (требуется содержать штат сотрудников, производственную инфраструктуру, большой комплекс технологических и тяговых машин и оборудования) (Яконовская, 2024). Поэтому в последние годы ведется поиск экологической и экономической альтернативы путем проведения исследований, направленных на разработку высококачественных и недорогих субстратов, и, соответственно, поиск добавок к ним для снижения потребления торфа. Физико-химические свойства среды выращивания на основе торфа можно улучшить, добавив такие компоненты, как перлит, но он является дорогостоящим материалом, характеризуется низкой экологической устойчивостью и положительным электрическим зарядом, поэтому не вступает в соединения с внесенными удобрениями (Zulfiqar et al., 2019). Решением этой проблемы может стать использование органических добавок в составе торфяных субстратов. Но прямое их использование может привести к внесению патогенов или повышению концентрации тяжелых металлов, что негативно скажется на качестве урожая (Zulfiqar et al., 2019). Целесообразнее термически преобразовывать органический материал в твердый углеродистый продукт – биоуголь.

Биоуголь – это углеродистый материал, образующийся путем термического разложения биомассы в условиях отсутствия кислорода при температурах от 300 до 1000 °C (Kabir et al., 2023). Вследствие термохимического преобразования биомассы получаемый продукт не содержит вредителей, патогенов и семян сорняков (Zhang et al., 2023). Кроме того, в процессе разложения биомассы происходит удаление многих летучих веществ, способствуя образованию высокоуглеродистой структуры и, как следствие, достижению высокого показателя степени разложения органического вещества (C/N) (Холодов и др., 2020; Пономарев и др., 2024). Также биоуголь, как и удобрение с медленным высвобождением, содержит в себе определенные концентрации различных макро- и микроэлементов. Таким образом, биоуголь не просто снижает потребность в удобрениях, но и может существенно изменить органическую и минеральную составляющие торфа. Биоуголь уже привлек широкое внимание как средство улучшения почвы, повышения урожайности растений и снижения вымывания питательных веществ (Biederman, Harpole, 2013; Singh Yadav et al., 2023). Однако исследований, посвященных замене части торфа биоуглем, проведено недостаточно.

Так, например, известно, что биомасса растений может быть больше, если выращивать растения в торфяном субстрате с биоуглем по сравнению с торфяной средой без добавок (Méndez et al., 2015). При этом с ростом температуры переработки сырья вносимый биоуголь обеспечивает более высокий прирост растительной биомассы (Nieto et al., 2016). В других работах внесение биоугля в торф не оказало влияния на массу растений, но увеличило их высоту (Vaughn et al., 2013). Эти результаты сопровождались регистрацией снижения кислотности и роста электропроводности, насыпной плотности субстрата, его общей пористости и водоудерживающей способности (Vaughn et al., 2013; Margenot et al., 2018; Zhang et al., 2023), что, как отмечается в работе (Chrysargris et al., 2020), полезно при использовании кислых сред выращивания, к которым и относится торф. Показано (Lévesque et al., 2020), что при выращивании томатов и сладкого перца добавка к торфу на основе биоугля подходит лучше, чем перлит. Другие исследования показали, что биоуголь может заменить часть торфа в теп-

личном производстве без каких-либо отрицательных последствий для роста и урожайности мяты, базилика, томатов и бархатцев (Margenot et al., 2018; Huang et al., 2019; Yan et al., 2020). Однако, как отмечают авторы (Chrysargris et al., 2020), каждый вид растений требует специальной оценки, так как результаты могут быть не общими.

Внесение биоугля в торф благоприятно оказывается на разнообразии бактерий в ризосфере выращиваемых растений (De Tender et al., 2016). А, согласно предположениям (Chrysargris et al., 2020), ускоренный метаболизм почвенной биоты приводит к изменениям органической и минеральной частей торфа. Более того, обработка биоугля физическими (например, паровая активация) или химическими (смешивание с удобрениями или пропитка питательным раствором) методами может способствовать высоким показателям содержания макроэлементов (N, P, K) в субстрате (Chrysargris et al., 2020; Osman et al., 2022). Авторы (Lévesque et al., 2020) утверждают, что применение биоугля может позволить сократить внесение удобрений без снижения урожайности плодов, однако необходимы дальнейшие исследования, чтобы определить, как биоуголь влияет на свойства торфа, так как индивидуальное использование биоугля в качестве среды для выращивания или высокие дозы его внесения (>80% об.) не показывают положительного результата, подавляя рост растений (Méndez et al., 2015; Nieto et al., 2016; Huang et al., 2019; Yan et al., 2020).

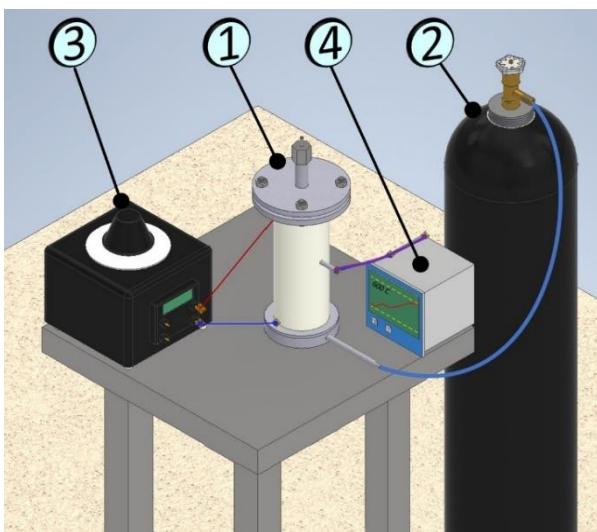
Рассмотренные выше исследования направлены преимущественно на оценку массы выращиваемых растений и частично на физические свойства торфа (плотность, пористость и др.). Актуальность и значимость применения такой добавки видятся оправданными. При этом оценка изменения органической и минеральной частей торфа при внесении в него биоугля остается малоизученной областью и требует рассмотрения. Целью работы явилось установление влияния биоугля на содержание углерода в торфяном субстрате, степень разложения органического вещества и минеральный состав (Ca, K, P, Mg и др.) субстрата. Особое внимание удалено анализу изменений содержания основных питательных элементов, тяжелых металлов и неметаллов в торфяном субстрате при частичной замене его биоуглем.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

В качестве основы субстратов рассмотрен широко распространенный в Западной Сибири сфагновый верховой торф ( $\text{pH}_{\text{KCl}} = 4.66$ ; C = 47.5%, N = 1.2%), который в природе подвержен осушению и деградации, что вызывает экологические проблемы, а в сельском хозяйстве является недостаточно продуктивным из-за низкой концентрации макро- и микроэлементов (De Melo et al., 2014; Спирина и др., 2014). С целью изменения свойств торфа к нему добавлялись биоугли из скорлупы кедровых орехов – местного для Сибири вторичного сырья. Кедровый орех находится в списке стратегически важных товаров и ресурсов в России. Большие объемы производства кондитерских товаров из него и высокие экспортные пошлины на неочищенные кедровые орехи приводят к колоссальным объемам отходов в виде скорлупы кедровых орехов. Биоуголь из них получен методом пиролиза (рис. 1) (Пономарев и др., 2024).

Скорлупу кедровых орехов высушивали до воздушно-сухого состояния при температуре 20–25 °C. Затем ее помещали в реактор 1 и закрывали фланцевые соединения. В течение 5 минут реактор продували инертным газом (азотом) 2 с целью удаления кислорода. Нагрев реактора осуществлялся с использованием автотрансформатора 3. Через 1 час температура в реакторе достигала 600 °C и выходила на квазистационарный режим. Контроль температуры проводили с помощью термопары ТЭЦ-57 (тип K), подключенной к регистратору температуры ТМ 5104 4. Через 0.5 часа изотермической выдержки автотрансформатор выключался и реактор остывал до комнатной температуры. Твердый продукт пиролиза (биоуголь) извлекали из реактора и хранили в герметичной таре. Свойства полученного биоугля (Б) и влияние его на органическую и минеральную части сравнивались с активированным биоуглем (АБ) из скорлупы кедровых орехов, активация которого осуществлялась водяным паром с температурой 1000 °C.

Исследуемые биоугли (Б и АБ) вносились в торф в концентрации 10% и 20% об. в неизмельченном и измельченном (изм) виде.



**Рис. 1.** Экспериментальная установка для получения биоугля:  
1 – реактор; 2 – баллон с инертным газом; 3 – автотрансформатор ЛАТР;  
4 – термометр многоканальный.

**Fig. 1.** Experimental setup for biochar production: 1 – reactor; 2 – inert gas cylinder; 3 – autotransformer LATR; 4 – multichannel thermometer.

Выбранные концентрации (10% и 20% об.) обоснованы известными данными о том, что биоугли (например, из кленовой коры и сосновой щепы или пшеничной соломы) могут заменить до 20% (об./об.) дорогостоящего перлита в субстрате на основе торфа, увеличив биомассу и урожай выращиваемых в теплицах растений (Zulfiqar et al., 2019; Lévesque et al., 2020). При этом высокие концентрации мелиорантов могут принести вред, а не пользу растениям (Chrysargris et al., 2020). Измельчение биоуглей проводилось на мельнице VLM-25 (Вилитек, Россия) с получением частиц размером до 0.05 мм. Торфяные субстраты с биоуглем вносились в вегетационные сосуды объемом до 1 л с трехкратной повторностью по следующей схеме: Т – торф-контроль (торф без биоуглей); Т+Б10 – торф с концентрацией биоугля Б 10% об.; Т+Б20 – торф с концентрацией биоугля Б 20% об.; Т+Б10 (изм) – торф с концен-

трацией измельченного биоугля Б 10% об.; Т+Б20 (изм) – торф с концентрацией измельченного биоугля Б 20% об.; Т+АБ10 – торф с концентрацией биоугля АБ 10% об.; Т+АБ20 – торф с концентрацией биоугля АБ 20% об.; Т+АБ10 (изм) – торф с концентрацией измельченного биоугля АБ 10% об.; Т+АБ20 (изм) – торф с концентрацией измельченного биоугля АБ 20% об. После этого в течение 1 месяца в субстратах выращивалась микрозелень (рукола) в количестве 12 семян на вегетационный сосуд. После завершения вегетационного опыта надземная и подземная части руколы удалены с целью пробоподготовки исследуемых образцов (Т, Т+Б10, Т+Б20, Т+Б10 (изм), Т+Б20 (изм), Т+АБ10, Т+АБ20, Т+АБ10 (изм), Т+АБ20 (изм)) для определения в торфяных субстратах концентрации макро- и микроэлементов.

Удельная площадь поверхности биоуглей измерялась методом Брунауэра–Эммета–Теллера (БЭТ) с использованием адсорбционного анализатора удельной поверхности и пористости 3Р sync 210 (Ribori Instrumentation, Германия). Образцы высушивались при 125 °С в течение 12 ч. Затем осуществлялась дегазация образцов в вакууме в течение 12 часов при температуре 300 °С. Площадь поверхности образцов определялась при температуре -196 °С.

Распределение основных питательных элементов (азот, фосфор и калий) на поверхности биоуглей определено на растровом электронном микроскопе Tescan Mira 3 с использованием EDS приставки Oxford instruments X-Max при ускоряющем напряжении 5 кВ. Построение карты проведено с помощью программы AZtec.

Углерод (С), как основной элемент органической части исследуемых образцов (биоуглей и торфяных субстратов с ними), азот (N), до 95% которого приходится на долю органических соединений (белков, аминокислот и др.), и соотношение С/N, как важный показатель, характеризующий степень разложения органического вещества, определены методом сухого каталитического сжигания в токе кислорода на автоматическом анализаторе Vario MicroCube (Elementar, Германия). Перед каждым измерением работоспособность прибора проверяли на стандартном образце сульфаниламида (Табакаев и др., 2024).

Содержание минеральных компонентов (Ca, Mg, Na и др.) биоуглей и субстратов определялось методом атомно-абсорбционной спектроскопии с применением спектрофотометра PlasmaQuant PQ 9000 (Analytik Jena, Германия) (Василевич, 2018; Vasilevich et al., 2023). Определение элементов проводилось в пламени аргон-воздух, что позволило достичь высокой чувствительности и точности измерений (Беляцкий, 2015). Контроль точности измерений выполнен методом “введено-найдено” и методом стандартного образца, что позволило оценить точность экстракции и стабильность отклика прибора (Моисеева и Потапова, 2019). В качестве экстрагента использовалась азотная кислота ( $\text{HNO}_3$ ) в комбинации с дистиллированной водой, что обеспечивает эффективное растворение целевого спектра элементов без риска потерять летучих соединений. Экстракция кислоторастворимых форм элементов из торфа, биоуглей и субстратов проводилась из отдельных навесок в двухкратной повторности. Результатом измерения считалось среднее арифметическое значение измерений при расхождении величин менее 5% (Московченко, Романенко, 2020).

В отличие от валового содержания, включающего все элементы, независимо от их доступности, кислоторастворимые формы предоставляют информацию о потенциально мобилизуемых элементах, способных участвовать в биогеохимических процессах, особенно в кислых средах (Arbuzov et al., 2018; Василевич, 2018; Vasilevich et al., 2023). Для получения кислоторастворимых форм навеска воздушно-сухой пробы массой 2.00 г, взвешенная на аналитических весах с точностью до 0.01 г, помещалась в коническую колбу вместимостью 50 см<sup>3</sup>, в которую приливалось 10 см<sup>3</sup> 5 моль/дм<sup>3</sup> кислоты  $\text{HNO}_3$ , закрывалась и ставилась на перемешивающее устройство Loip LS-110 (LOIP, Россия). В течение трех часов со скоростью 125 оборотов и при температуре 80 °C осуществлялось вращение образцов. После охлаждения и перемешивания вытяжка переносилась на фильтр. Фильтрование проводилось через складчатый фильтр “Синяя лента” в мерных колбах объемом 50 см<sup>3</sup>. Конические колбы и осадки на фильтре два раза промывались дистиллированной водой. Раствор доводился до метки и перемешивался. Подготовленные для анализа образцы переливались в пробирки.

Массовая доля элементов в образцах и среднее значение двух результатов измерений массовой доли элементов определялись по М-МВИ-80-2008. Для корректной верификации результатов исследований придерживались процедуры нормативных документов ПНД Ф 16.1:2.3:3.11-98 и РД 52.18.191-2018. Руководство требованиями таких документов при проведения количественно-химического анализа отдельных форм элементов в образцах принято считать оправданным (Василевич, 2018).

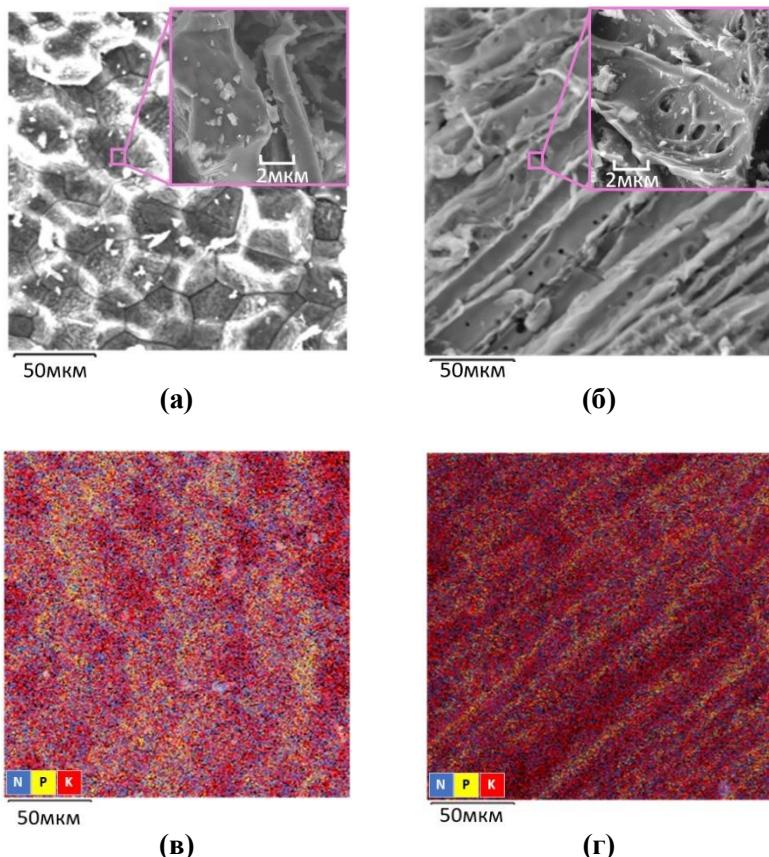
Статистическая обработка данных включала вычисление средних значений, указанных на графиках, и абсолютной погрешности (Тимофеева и др., 2024). Достоверность различий оценивали методом дисперсионного анализа (ANOVA). Значимость различий между средними значениями анализировалась с использованием критерия Тьюки.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

### **Текстурные характеристики высокопористых биоуглей**

Морфология и текстурные характеристики высокопористых биоуглей являются значительными факторами, определяющими их свойства и потенциальное применение. На рисунке 2 приведены снимки поверхности биоуглей *Б* и *АБ*, позволяющие судить о морфологии и распределении основных минеральных компонентов.

С использованием сканирующего электронного микроскопа рассмотрены и выявлены морфологические особенности биоуглей, полученных при температурах 600 °C (рис. 2а) и 850–1000 °C (рис. 2б) из скорлупы кедрового ореха. Видно, что биоугли характеризуются высокой пористостью, что связано с интенсивным выделением летучих соединений при термической обработке сырья. Изображение (рис. 2а) показывает ячеистую гексагональную структуру не активированного биоугля с относительно гладкими поверхностями, так как при температуре 600 °C органические компоненты, присутствующие в биоугле разлагались, сохраняя стенки клеток относительно целыми (Tammeorg et al., 2013).



**Рис. 2.** Электронное изображение структуры поверхности не активированного (а) и активированного (б) биоугля из скорлупы кедрового ореха, а также многослойное изображение распределения основных питательных элементов (азот (N), фосфор (P), калий (K)) в не активированном (в) и активированном (г) биоугле.

**Fig. 2.** An electronic image of the surface structure of unactivated (a) and activated (b) biochar from pine nut shell, and a multilayer image of the distribution of major nutrients (nitrogen (N), phosphorus (P), and potassium (K)) in unactivated (c) and activated (d) biochar.

Более высокие температуры и активация паром привели к большему разложению органических веществ, увеличивая пористость и разрушая структуры стенок, что подтверждает образование большого количества пор размером менее 2 мкм (рис. 2б). Интенсивное воздействие пара привело к агрессивному разрушению стенок, образуя сетчатую структуру и систему разветвленных пор, увеличивая тем самым площадь поверхности. Такие особенности строения структуры высокопористых биоуглей указывают на их высокую сорбционную способность (Микова и др., 2024).

Рисунок 2 (в, г) показывает распределение основных минеральных элементов (N, P, K) по поверхности биоуглей. На изображении (рис. 2в) можно увидеть, что данные элементы распределены относительно равномерно, но с некоторой неоднородностью по всей поверхности. В активированном биоугле (рис. 2г) распределение элементов заметно отличается, с преобладанием калия (K) и фосфора (P), но уменьшением азота (N). Это указывает на то, что в процессе активации часть минеральных элементов была перераспределена.

С целью более детального анализа рассмотрены текстурные характеристики биоуглей *Б* и *АБ* в сравнении с характеристиками торфа *Т* (табл. 1).

**Таблица 1.** Текстурные характеристики образцов торфа и двух биоуглей, использованных в эксперименте

**Table 1.** Textural characteristics of peat and two biochar samples used in the experiment

Образцы	$S_{BET}$ , м <sup>2</sup> /г	$V_p$ , см <sup>3</sup> /г	$D_p$ , нм
Торф	3.3	0.014	16.6
Биоуголь	195.9	0.149	3.1
Активированный биоуголь	826.1	0.555	2.7

**Примечание.**  $S_{BET}$  – удельная площадь поверхности торфа и биоуглей;  $V_p$  – размер пор рассматриваемых образцов;  $D_p$  – диаметр пор.

**Note.**  $S_{BET}$  specific surface area of peat and biochar;  $V_p$  – pore size of the samples;  $D_p$  – pore diameter.

Рост температуры или активация являются доминирующими факторами увеличения пористости и удельной площади поверхности биоугля (Chai et al., 2024; Handiso et al., 2024). Площадь поверхности является ключевым фактором, определяющим сорбционную способность материалов (Handiso et al., 2024). Данные, приведенные в таблице 1, подтверждают тот факт, что в зависимости от условий получения биоугля площадь поверхности биоуглей может существенно отличаться (Bu et al., 2022; Wang et al., 2022). Активированный биоуголь (*AB*) имеет высокую площадь поверхности  $S_{BET} = 826.1 \text{ м}^2/\text{г}$  при температуре активации  $1000^\circ\text{C}$ . Биоуголь *B* также имеет значительную площадь поверхности, но ниже, чем у *AB* ( $S_{BET} = 195.9 \text{ м}^2/\text{г}$ ). Такой результат свидетельствует о высокой пористости и потенциальной сорбционной способности биоуглей, что в свою очередь помогает им сохранять в себе воду и питательные вещества (Chai et al., 2024; Handiso et al. 2024). Объем пор исследуемых биоуглей и их средний диаметр находится в диапазонах  $V_p = 0.555\text{--}0.149 \text{ см}^3/\text{г}$  и  $D_p = 2.689\text{--}3.050 \text{ нм}$  соответственно. В торфе же размер пор более чем в 5 раз выше, чем в исследуемых биоуглях, а объем пор составляет  $0.014 \text{ см}^3/\text{г}$ , что способствует низкой сорбции питательных веществ.

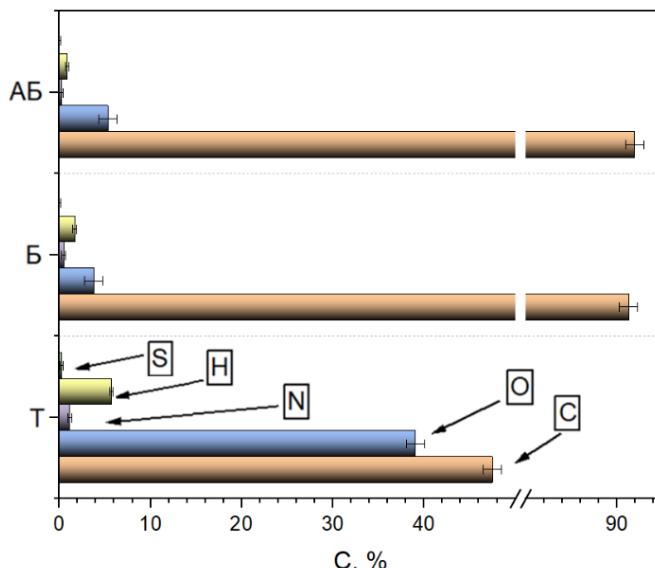
### Элементный состав торфа и исследуемых биоуглей

На рисунке 3 представлена массовая концентрация серы (S), водорода (H), азота (N), кислорода (O) и углерода (C) в верховом торфе (*T*), биоугле из скорлупы кедрового ореха (*B*) и активированном биоугле (*AB*).

Результаты элементного анализа показали (рис. 3), что в торфе содержится больше серы, водорода, азота, кислорода и значительно меньше углерода по сравнению с биоуглями, так как торф – неразложившийся органический материал, а биоугли – продукты пиролиза, в процессе которого удалялись летучие соединения, увеличивая долю углерода в составе исследуемых образцов.

Оценка содержания в торфе и образцах биоуглей питательных элементов (калий, азот, фосфор), микроэлементов и тяжелых металлов, позволяет судить о перспективах их использования для выращивания растений. На рисунке 4 приведены результаты

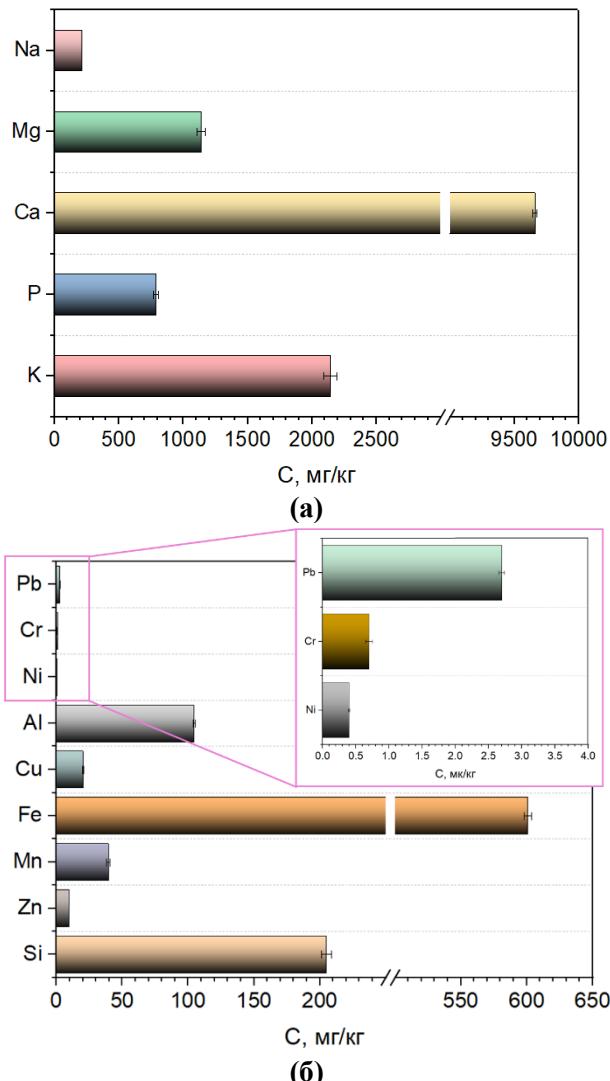
определения кислоторастворимых форм различных элементов в торфе (концентрации Cd и Co не указаны, они ниже предела обнаружения: < 0.01 мг/кг и < 0.02 мг/кг соответственно).



**Рис. 3.** Элементный состав (S, H, N, O, C) торфа (T), биоугля из скорлупы кедрового ореха (B) и активированного биоугля из скорлупы кедрового ореха (AB).

**Fig. 3.** Elemental composition (S, H, N, O, C) of peat (T), pine nut shell biochar (B) and activated pine nut shell biochar (AB).

Верховой торф формируется в условиях высокой влажности при недостатке кислорода, что в свою очередь влияет на концентрацию элементов в его составе (Карпенко, 2009). Агрономическая ценность торфа зависит от состава его неорганической части и содержания элементов. Ключевую роль в формировании свойств торфа и его потенциала как субстрата играют макроэлементы: K, P, Ca, Mg, которые определяют питательную ценность торфа (Тишкович, 1983; Степанова, Покровский, 2011).



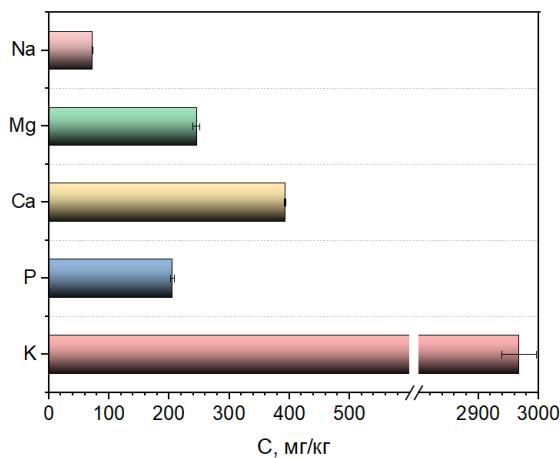
**Рис. 4.** Содержание кислоторастворимых форм макроэлементов (а) и микроэлементов (б) в верховом торфе.

**Fig. 4.** Content of acid-soluble forms of macroelements (a) and microelements (b) in high moor peat.

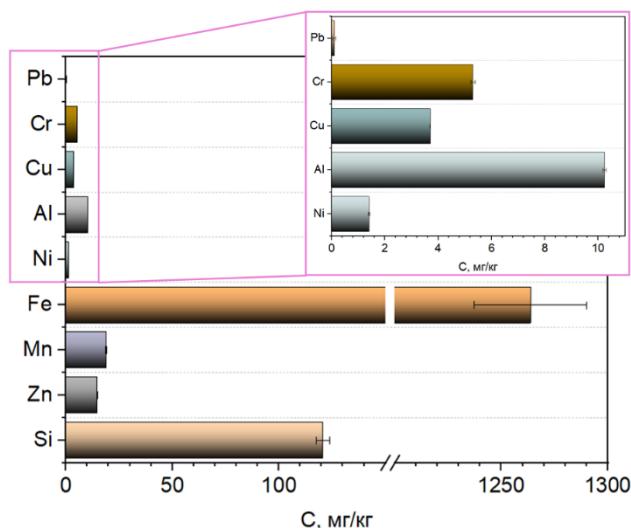
Концентрация кислоторастворимых форм калия (К) в составе торфа составляет 2.14 г/кг, что в свою очередь способствует повышению плодородия среды выращивания и увеличению урожайности культур. Содержание фосфора (Р) достигает 789 мг/кг и благоприятно влияет на развитие растений (Акимова, 2023). Видно (рис. 4а), что кальций (Са) обладает более высокой концентрацией (9.66 г/кг) по сравнению с остальными элементами. Содержание данного макроэлемента в верховом торфе связано с его биогенной аккумуляцией (Степанова, Покровский, 2011). Кальций является одним из наиболее стабильных элементов в типичном верховом торфе и необходим для роста и развития растений, участвуя в формировании клеточных стенок и регулировании различных физиологических процессов (Швартай и др., 2014). Высокое содержание Са в торфе объясняется его распространностью в природе, в водоемах, в составе растительности (Яковлев и др., 2020). Содержание кальция в торфе играет роль регулятора процесса распада органического вещества в торфогенном слое, нейтрализуя кислотность и интенсифицируя микробиологическую деятельность (Тишкович, 1983). Содержание магния (Mg) составило 1.14 г/кг, что в 5.5 раза выше концентраций кремния (Si) и натрия (Na). Концентрация железа (Fe) не превышала 600 мг/кг, алюминия (Al) – 105 мг/кг, а остальных элементов – 20 мг/кг (рис. 4б). Можно заметить, что концентрации тяжелых металлов (Ni, Cr, Co, Cd, Pb) незначительны, что говорит о безопасном использовании торфа в качестве субстрата.

На рисунке 5 представлено содержание макро- и микроэлементов в исследуемых биоуглях из скорлупы кедрового ореха (концентрации Cd и Co не указаны, они ниже предела обнаружения: < 0.01 мг/кг и < 0.02 мг/кг соответственно).

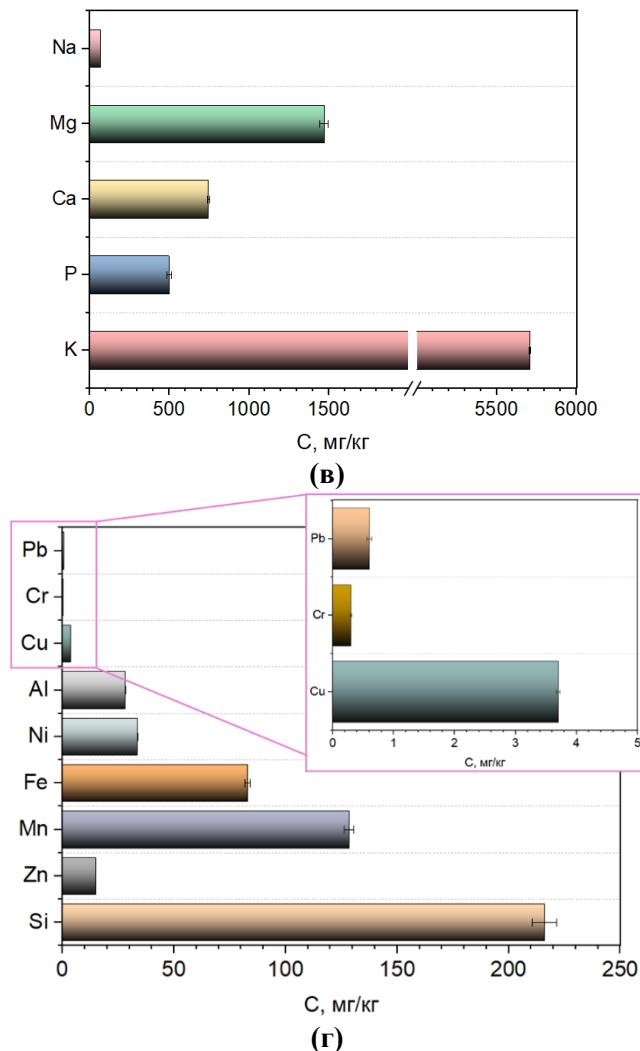
В результате анализа установлено, что при сравнении двух различных биоуглей, полученных при 600 °C и при 850–1000 °C с активацией паром, содержание элементов выше в АБ (рис. 5). Процесс активации биоугля паром приводит к значительным изменениям в макро- и микроэлементном составе. Существенный рост доли калия (K) указывает на перспективу применения биоуглей в качестве альтернативных добавок к торфяному субстрату.



(а)



(б)



**Рис. 5.** Содержание кислоторастворимых форм макроэлементов (а, в) и микроэлементов (б, г) в биоугле (а, б) и активированном биоугле (в, г).

**Fig. 5.** Content of acid-soluble forms of macroelements (a, b) and microelements (b, g) in biochar (a, b), and in activated biochar (b, g).

Его концентрация в *B* почти в 2 раза меньше, чем в *AB*. Это связано с высвобождением элементов из структуры углеродистого остатка при его активации (Qian et al., 2019). Помимо калия в *AB* можно выделить высокую концентрацию кислоторастворимых форм других зольных элементов, таких как фосфор (P) и кальций (Ca), концентрация которых увеличилась в 2.4 и 1.9 раза, соответственно, а концентрация магния (Mg) в активированном биоугле выросла в 6 раз и составила 1.47 г/кг (рис. 5в).

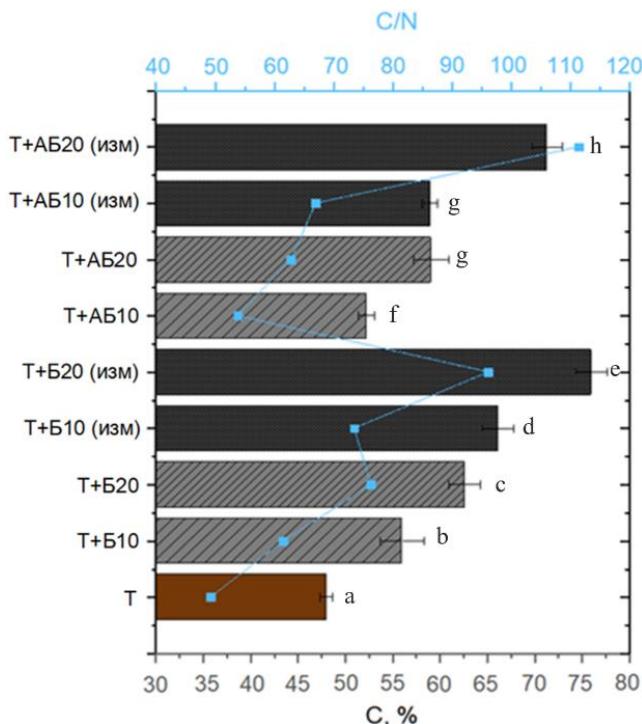
Однако можно заметить (рис. 5г), что после активации биоугля концентрация железа (Fe) существенно снижается в 15.2 раза, что может быть связано с его удалением вместе с жидкими продуктами пиролиза в виде соединений, таких, например, как Fe(OH)<sub>3</sub> (Wang et al., 2019). Содержащиеся в биоугле макро- и микроэлементы (железо, кальций, магний) способствуют десульфуризации – связыванию соединений серы в малодоступные соединения (Ahmed et al., 2024). Содержание натрия (Na) снизилось в 1.1 раза, а концентрации кремния (Si), марганца (Mn), никеля (Ni) и алюминия (Al), наоборот, увеличились в 1.8, 6.7, 24 и в 2.7 раза соответственно. На содержание элементов цинк (Zn) и медь (Cu) активация паром в биоугле практически не повлияла.

Важным достоинством образцов исследуемых биоуглей (*B* и *AB*) является низкое содержание в них тяжелых металлов (Pb, Cd, Co, Cr и Cu) (рис. 5), что указывает на относительно чистое от загрязняющих веществ исходное сырье (скорлупа кедрового ореха) и продукт, получаемый из него. Это подтверждает факт экологически безопасного применения биоуглей в качестве добавок, частично заменяющих торф в субстратах для выращивания растений (Méndez et al., 2015; Nieto et al., 2016).

### **Содержание органических компонентов и кислоторастворимых форм макро- и микроэлементов в торфяных субстратах**

Полученные в работе данные по элементному составу биоуглей позволяют считать их хорошей добавкой к питательной среде на основе торфа для выращивания растений. Поэтому далее проведен анализ изменения органической и минеральной частей торфяных субстратов с биоуглями *B* и *AB*.

На рисунке 6 представлены концентрация углерода и отношение C/N в субстратах.



**Рис. 6.** Концентрация углерода и отношение C/N в субстратах:  $T$  – верховой торф;  $T+B10 / T+B20$  – торф с биоуглем концентрацией 10%/20%;  $T+B10 (\text{изм}) / T+B20 (\text{изм})$  – торф с измельченным биоуглем концентрацией 10%/20%;  $T+AB10 / T+AB20$  – торф с активированным биоуглем концентрацией 10%/20%;  $T+AB10 (\text{изм}) / T+AB20 (\text{изм})$  – торф с измельченным активированным биоуглем концентрацией 10%/20%.

**Fig. 6.** Carbon concentration and C/N ratio in substrates:  $T$  – top peat;  $T+B10 / T+B20$  – peat with biochar concentration of 10%/20%;  $T+B10 (\text{изм}) / T+B20 (\text{изм})$  – peat with crushed biochar concentration of 10%/20%;  $T+AB10 / T+AB20$  – peat with activated biochar concentration of 10%/20%;  $T+AB10 (\text{изм}) / T+AB20 (\text{изм})$  – peat with crushed activated biochar concentration of 10%/20%.

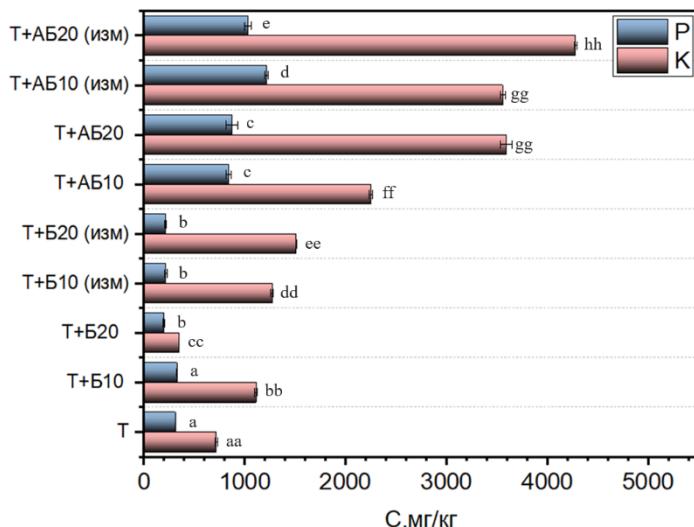
В контрольном образце (торфе) без добавок содержание углерода составляло около 48%. Добавление разного вида биоугля во всех вариантах привело к увеличению концентрации углерода (С) до 52–76%, что является очевидным, исходя из высокого содержания углерода в рассматриваемых биоуглях (рис. 6). Наибольшее увеличение концентрации углерода наблюдается в вариантах с внесенным измельченным биоуглем большей концентрации (20% об.).

Добавление биоугля во всех вариантах привело к увеличению С/N, что обусловлено высоким содержанием углерода в биоугле и снижением азота. В контрольном образце соотношение С/N составляло 49,3, что характерно для данного органического субстрата и свидетельствует о его низкой биохимической активности с замедленным разложением (из-за недостатка азота) (Карпенко, 2009). При увеличении концентрации биоугля в субстрате соотношение С/N увеличивается, что снижает доступность азота и может замедлить разложение органического вещества. Высокие значения С/N (>100) в вариантах с 20% биоугля могут указывать на потенциальный азотный дефицит, требующий дополнительного внесения азотных удобрений. В связи с этим, можно сделать вывод, что высокие концентрации биоугля могут способствовать устойчивости к микробному разложению, но и возможному снижению доступности азота для растений.

Для более подробного анализа и экологической оценки биоуглей в качестве применяемой добавки в торфяной субстрат, необходимо рассмотреть их влияния на макро- и микроэлементный состав приготовленной смеси. На рисунке 7 представлены результаты определения концентраций наиболее важных макроэлементов (К, Р) в верховом торфе и торфяных субстратах с внесенным в разных концентрациях (10 и 20 % об.) и виде (не измельченном и измельченном (изм)) биоуглями, полученными медленным пиролизом при 600°C (Б) и при пиролизе с активацией паром до 1000°C (АБ).

Установлено (рис. 7), что внесение биоугля достоверно увеличивает концентрацию калия в торфяном субстрате (за исключением варианта Т+Б20) более чем в 2 раза. При этом добавление активированного биоугля (АБ) привело к большему увеличению К

(в 4–4.9 раза) по сравнению с добавлением обычного биоугля (*B*)  
(в 2.1–3.9 раза).



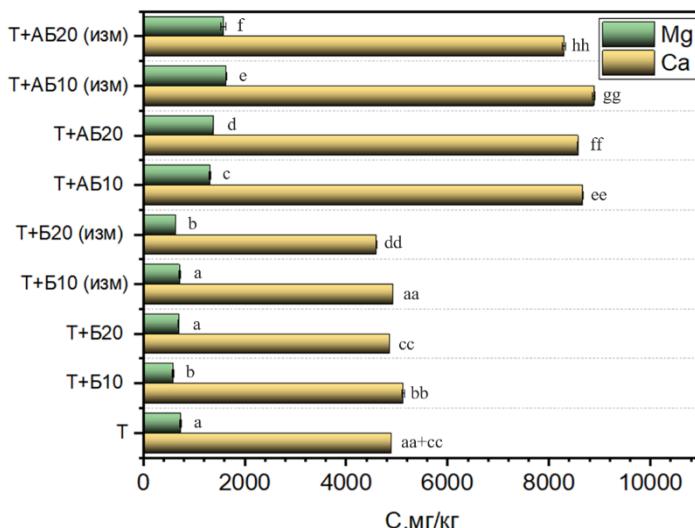
**Рис. 7.** Концентрация калия и фосфора в субстратах: *T* – верховой торф; *T+B10 / T+B20* – торф с биоуглем концентрацией 10%/20%; *T+B10 (изм) / T+B20 (изм)* – торф с измельченным биоуглем концентрацией 10%/20%; *T+AB10 / T+AB20* – торф с активированным биоуглем концентрацией 10%/20%; *T+AB10 (изм) / T+AB20 (изм)* – торф с измельченным активированным биоуглем концентрацией 10%/20%.

**Fig. 7.** Potassium and phosphorus concentrations in substrates: *T* – top peat; *T+B10 / T+B20* – peat with biochar concentration of 10%/20%; *T+B10 (изм) / T+B20 (изм)* – peat with crushed biochar concentration of 10%/20%; *T+AB10 / T+AB20* – peat with activated biochar concentration of 10%/20%; *T+AB10 (изм) / T+AB20 (изм)* – peat with crushed activated biochar concentration of 10%/20%.

Внесение *B* в торфяной субстрат снизило концентрацию фосфора (Р) примерно в 1.5–1.6 раза (за исключением варианта *T+B10*). При добавлении *AB* в торф можно наблюдать увеличение Р в 1.6–2.8 раза. Это объясняется высокой концентрацией основных питательных элементов (К, Р) в *AB* (примерно в 1.9–2.4 раза

выше по сравнению с *Б*). Можно заметить, что в образцах субстратов с измельченной активированной добавкой концентрация элементов выше, что, скорее всего, связано с более равномерным, приводящим к гомогенизированному состоянию, распределением биоугля по объему субстрата.

На рисунке 8 приведены результаты определения концентрации Ca и Mg в исследуемых субстратах.



**Рис. 8.** Концентрация кальция и магния в субстратах: *T* – верховой торф; *T+B10 / T+B20* – торф с биоуглем концентрацией 10%/20%; *T+B10 (изм) / T+B20 (изм)* – торф с измельченным биоуглем концентрацией 10%/20%; *T+AB10 / T+AB20* – торф с активированным биоуглем концентрацией 10%/20%; *T+AB10 (изм) / T+AB20 (изм)* – торф с измельченным активированным биоуглем концентрацией 10%/20%.

**Fig. 8.** Calcium and magnesium concentrations in substrates: *T* – top peat; *T+B10 / T+B20* – peat with biochar concentration of 10%/20%; *T+B10 (изм) / T+B20 (изм)* – peat with crushed biochar concentration of 10%/20%; *T+AB10 / T+AB20* – peat with activated biochar concentration of 10%/20%; *T+AB10 (изм) / T+AB20 (изм)* – peat with crushed activated biochar concentration of 10%/20%.

Видно (рис. 8), что добавление в субстрат активированного биоугля привело к значительным изменениям элементного состава смеси. Например, у образцов торфа с активированным биоуглем (10 и 20% об.) наблюдается увеличение концентрации кальция (Ca) и магния (Mg) в 1.7–1.8 раза и 1.03–1.2 раза соответственно, по сравнению с контролем (*T*). Стоит отметить, что ионы кальция способны конкурировать с тяжелыми металлами в почвенных процессах и ингибировать их негативное воздействие (Кабата-Пендиас и Пендиас, 1989; Lima et al., 2024). Высокое содержание кальция в приготовленном субстрате указывает на большие перспективы добавки в виде измельченного *AB*, по сравнению с *B*.

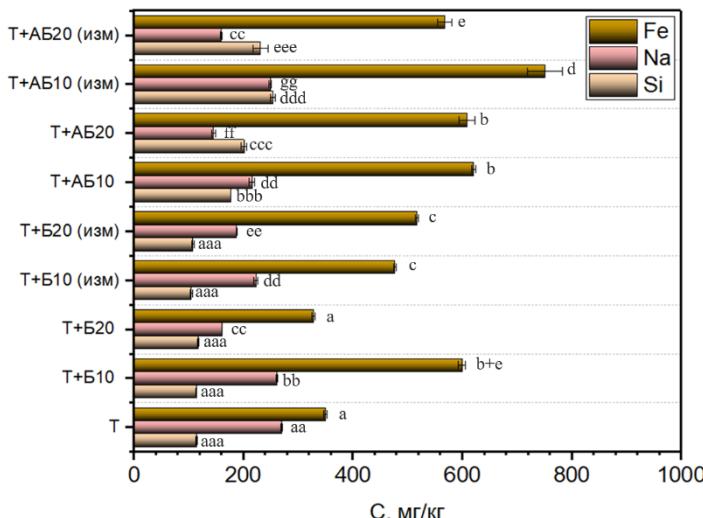
На рисунке 9 представлена концентрация Fe, Na и Si в исследуемых субстратах.

Концентрация железа (Fe) при добавлении в торф биоугля 10% об. увеличилась в 1.4–1.7 раза (рис. 9). Увеличение дозы внесения добавки повлияло по-разному, в зависимости от вида биоугля: измельченная добавка увеличила концентрацию Fe в 1.5 раза, а не измельченная не привела к достоверному изменению концентрации элемента. При добавлении в торф активированного биоугля установлено увеличение концентрации железа и кремния в 1.5–2.2 раза, особенно при внесении не высокой дозы и в измельченном виде. Концентрация натрия (Na) достоверно снижалась при внесении в торф *B* и *AB* любого вида (измельченного и неизмельченного), причем наибольшее снижение (до 1.4 раза) наблюдалось при использовании большей концентрации биоуглей.

Концентрация Al, Cu, Mn и Zn в исследуемых субстратах приведена на рисунке 10.

При добавлении в торф *B* установлено уменьшение концентрации меди (Cu) в 1.1–1.2 раза (за исключением варианта *T+Б10*, в котором зарегистрирован рост Cu в 1.4 раза). Для торфа с *AB* наблюдался обратный эффект, зарегистрирован рост концентрации меди до 1.8 раза (за исключением варианта *T+AB20 (изм)*, в котором концентрация Cu уменьшилась в 1.2 раза). Возможно, при добавлении *B* ионы меди из-за высокой пористости биоугля связывались с функциональными группами на поверхности углеродного остатка (Liu et al., 2021), а в случае с *AB* – рост количества карбоксильных и фенольных групп на поверхности биоугля при-

вел к мобилизации Cu (Томина и др., 2023).

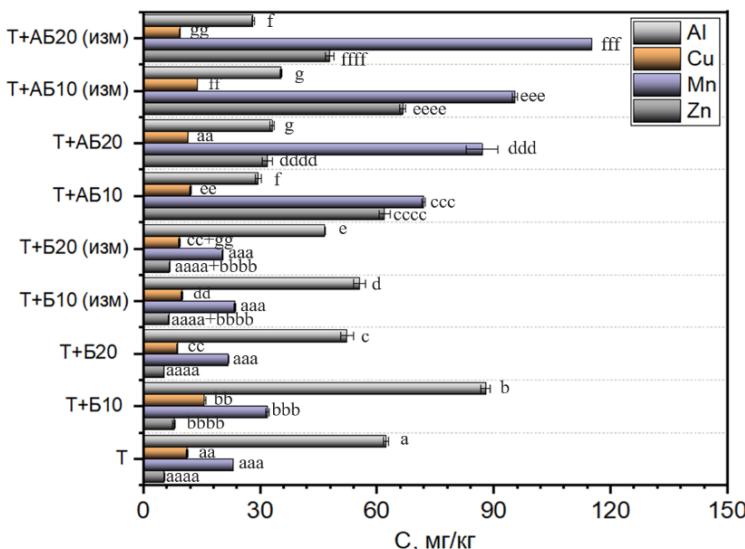


**Рис. 9.** Концентрация железа, натрия и кремния в субстратах:  $T$  – верховой торф;  $T+B10$  /  $T+B20$  – торф с биоуглем концентрацией 10%/20%;  $T+B10$  (изм) /  $T+B20$  (изм) – торф с измельченным биоуглем концентрацией 10%/20%;  $T+AB10$  /  $T+AB20$  – торф с активированным биоуглем концентрацией 10%/20%;  $T+AB10$  (изм) /  $T+AB20$  (изм) – торф с измельченным активированным биоуглем концентрацией 10%/20%.

**Fig. 9.** Iron, sodium, and silicon concentrations in substrates:  $T$  – top peat;  $T+B10$  /  $T+B20$  – peat with biochar concentration of 10%/20%;  $T+B10$  (изм) /  $T+B20$  (изм) – peat with crushed biochar concentration of 10%/20%;  $T+AB10$  /  $T+AB20$  – peat with activated biochar concentration of 10%/20%;  $T+AB10$  (изм) /  $T+AB20$  (изм) – peat with crushed activated biochar concentration of 10%/20%.

Концентрация алюминия (Al) снижалась в 1.1–1.3 раза при внесении  $B$  и в 1.4–1.5 раза – при внесении  $AB$  (за исключением варианта  $T+B10$ , в котором концентрация Al увеличилась в 1.4 раза). Концентрации цинка (Zn) и марганца (Mn) значительно увеличились в 4.9–11.4 раза и в 3–5 раз соответственно при внесении  $AB$ , по сравнению с  $B$ , внесение которого практически не повлияло

на Zn и Mn.



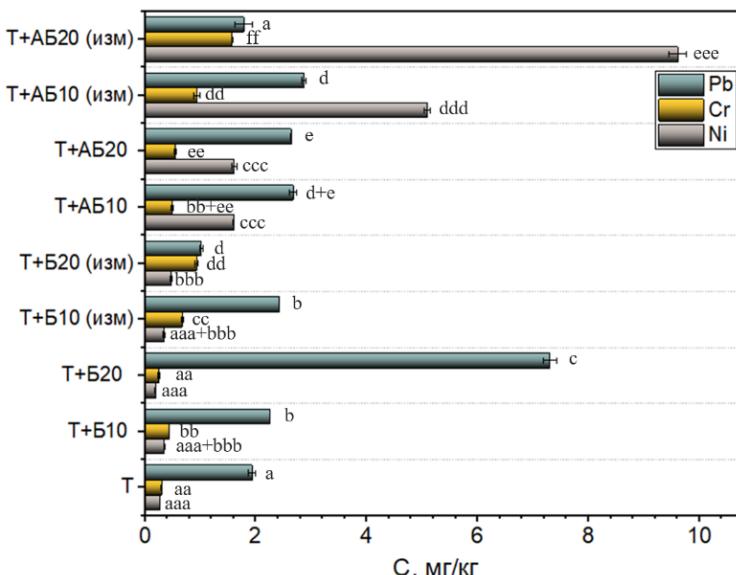
**Рис. 10.** Концентрация алюминия, меди, марганца и цинка в субстратах:  $T$  – верховой торф;  $T+B10 / T+B20$  – торф с биоуглем концентрацией 10%/20%;  $T+B10$  (изм) /  $T+B20$  (изм) – торф с измельченным биоуглем концентрацией 10%/20%;  $T+AB10 / T+AB20$  – торф с активированным биоуглем концентрацией 10%/20%;  $T+AB10$  (изм) /  $T+AB20$  (изм) – торф с измельченным активированным биоуглем концентрацией 10%/20%.

**Fig. 10.** Aluminium, copper, manganese, and zinc concentrations in substrates:  $T$  – top peat;  $T+B10 / T+B20$  – peat with biochar concentration of 10%/20%;  $T+B10$  (изм) /  $T+B20$  (изм) – peat with crushed biochar concentration of 10%/20%;  $T+AB10 / T+AB20$  – peat with activated biochar concentration of 10%/20%;  $T+AB10$  (изм) /  $T+AB20$  (изм) – peat with crushed activated biochar concentration of 10%/20%.

Цинк и марганец регулируют синтез белков и ферментов, которые защищают растения от различных стрессовых факторов окружающей среды (Stanton et al., 2022). Следовательно, обеспечение достаточного количества содержания данных микроэлементов способствует повышению внутренней способности растений

выдерживать стрессовые условия и восстанавливаться после них (Stanton et al., 2022; Ahmed et al., 2024). Наибольшая концентрация Zn и Mn зарегистрирована при внесении измельченного активированного биоугля в торф – 66.7 мг/кг и 115.2 мг/кг соответственно.

Концентрация Pb, Cr, Ni в исследуемых субстратах приведена на рисунке 11 (концентрации Cd и Co не указаны, они ниже предела обнаружения: <0.01 мг/кг и <0.02 мг/кг соответственно).



**Рис. 11.** Концентрация свинца, хрома и никеля в субстратах:  $T$  – верховой торф;  $T+B10$  /  $T+B20$  – торф с биоуглем концентрацией 10%/20%;  $T+B10$  (изм) /  $T+B20$  (изм) – торф с измельченным биоуглем концентрацией 10%/20%;  $T+AB10$  /  $T+AB20$  – торф с активированным биоуглем концентрацией 10%/20%;  $T+AB10$  (изм) /  $T+AB20$  (изм) – торф с измельченным активированным биоуглем концентрацией 10%/20%.

**Fig. 11.** Lead, chromium, and nickel concentrations in substrates:  $T$  – top peat;  $T+B10$  /  $T+B20$  – peat with biochar concentration of 10%/20%;  $T+B10$  (изм) /  $T+B20$  (изм) – peat with crushed biochar concentration of 10%/20%;  $T+AB10$  /  $T+AB20$  – peat with activated biochar concentration of 10%/20%;  $T+AB10$  (изм) /  $T+AB20$  (изм) – peat with crushed activated biochar concentration of 10%/20%.

Установлено, что при использовании активированного биоугля наблюдается существенное увеличение концентрации никеля (Ni) в 4.9–34.6 раза. Измельчение АБ приводило к увеличению концентрации элемента в 17.9–34.5 раза, скорее всего, из-за высокой площади контакта добавки с основой питательной среды (торфом). Измельчение и рост концентрации добавки также приводил к увеличению содержания хрома (Cr) до 5.4 раза. При добавлении в торф Б зарегистрировано увеличение концентрации свинца (Pb) в 1.1–3.8 раза (за исключением варианта Т+Б20% (изм), в котором концентрация Pb уменьшилась в 1.5 раза). Аналогичный результат получен и с активированным биоуглем – рост концентрации элемента в 1.4–1.5 раза, за исключением варианта с высокой дозой внесения измельченной добавки. Это объясняется тем, что измельченная форма сильнее сорбирует элементы, снижая их подвижность.

Таким образом, внесение биоугля и активированного биоугля в торф оказывает значительное влияние на распределение тяжелых металлов и для целенаправленного регулирования содержания этих элементов в торфе требуется оптимизация дозировки и формы биоугля в зависимости от конкретных задач на производстве. Полученные результаты свидетельствуют о том, что при выращивании растений в торфе, часть его может быть заменена биоуглем и лучшим вариантом будет являться внесение высокопористых активированных биоуглей в измельченном виде малой концентрацией (10% об.).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Внесение биоугля в торфяной субстрат оказывает комплексное влияние на органическую и минеральную части сфагнового верхового торфа. Установлено, что применение биоугля, особенно активированного и измельченного, приводит к увеличению содержания углерода в субстрате, что может способствовать его устойчивости к микробному разложению и улучшению агрофизических свойств. Однако увеличение соотношения С/N при внесении высоких доз биоугля указывает на возможное снижение доступности азота для растений. Это явление может привести к временному дефициту азота, что требует корректировки системы

удобрений (например, внесения дополнительного азота или применения биоугля, предварительно насыщенного питательными элементами).

Анализ кислоторастворимых форм макро- и микроэлементов показал значительное увеличение содержания калия, фосфора, кальция, магния, железа и кремния, а также микроэлементов (Zn, Mn) в субстрате при добавлении активированного биоугля. В то же время выявлено снижение концентрации меди и алюминия, что может благоприятно сказаться на росте растений. Концентрация тяжелых металлов и неметаллов была невысокой (например, концентрация Cr в торфяных субстратах с биоуглем не превышала 2 мг/кг), что подтверждает потенциальную эффективность и экологическую безопасность использования биоуглей в качестве добавок к торфу.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что применение биоугля является перспективной стратегией замены части торфяных субстратов, способствуя повышению их питательной ценности и снижению добычи и потребления медленно возобновляемого ресурса. Оптимальные дозировки и формы биоугля требуют дальнейшего изучения, однако на основании проведенного исследования наиболее рациональным видится применение активированного измельченного биоугля в концентрации 10% об., что обеспечивает обогащение субстрата элементами питания при минимальном риске накопления потенциально токсичных соединений.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акимова А.С. Круговорот соединений фосфора в почве // Международный научно-исследовательский журнал. 2023. Т. 134. № 8. С. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.23670/IJR.2023.134.38>.
2. Беляцкий В.Н. Основы методов атомно-абсорбционной и атомно-эмиссионной спектроскопии. Минск: БГМУ, 2015. 40 с.
3. В Тюмени будут развивать добычу торфа вместе с предприятиями Беларуси. URL: <https://tyumen-news.net/economy/2024/05/23/377097.html>.
4. Василевич Р.С. Макро- и микроэлементный состав мерзлотных бугристых торфяников лесотундры европейского северо-востока России // Геохимия. 2018. № 12. С. 1158–1172. DOI: <https://doi.org/10.1134/s0016752518100126>.

5. Кабата-Пендас А., Пендас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989. 439 с.
6. Карпенко Л.В. Микроэлементный состав торфяных почв Нижнего Приангарья // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. 2009. № 4. С. 139–144.
7. Микова Н.М., Иванов И.П., Жижсаев А.М., Кузнецов Б.Н. Влияние термощелочной активации NaOH коры лиственницы на структуру и сорбционные свойства полученных активных углей // Журнал Сибирского федерального университета Химия. 2024. № 17 (3). С. 407–418.
8. Моисеева Е.В., Потапова И.А. Атомно-абсорбционное определение ртути в моче методом холодного пара с использованием ртутно-гидридной приставки // Медицина труда и промышленная экология. 2019. Т. 59 № 10. С. 887–891. DOI: <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2019-59-10-887-891>.
9. Московченко Д.В., Романенко Е.А. Особенности элементного состава почв Пур-Тазовского междуречья // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2020. Вып. 103. С. 51–84. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-103-51-84>.
10. Пономарев К.О., Дрягина А.А., Филимоненко Е.А., Димитрюк И.Д. Влияние биоуглей на концентрацию доступных для растений элементов в почве // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2024. № 120. С. 265–294. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2024-120-265-294>.
11. Спирина В.З., Соловьева Т.П. Агрохимические методы исследования почв, растений и удобрений. Томск: ТГУ, 2014. 336 с.
12. Степанова В.А., Покровский О.С. Макроэлементный состав торфа выпуклых верховых болот средней тайги Западной Сибири (на примере болотного комплекса “Мухрино”) // Вестник Томского государственного университета. 2011. № 352. С. 211–214.
13. Табакаев Р.Б., Пономарев К.О., Калинич И.К., Гайдабрус М.А., Шулаев Н.А., Елецкий П.М. Комплексная СВЧ-переработка высокозольного бурого угля для нужд энергетической и металлургической отраслей // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. 2024. Т. 335. № 1. С. 57–68. DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2024/1/4336>.
14. Тимофеева М.В., Гончарова О.Ю., Матышак Г.В. Вынос углерода из торфяных почв севера Западной Сибири в разных гидрологических условиях // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2024. № 119. С. 211–241. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2024-119-211-241>.

15. Тишикович А.В., Мееровский А.С., Вирясов Г.П., Усюкевич Г.А., Баранникова Е.В. Торф на удобрение // Наука и техника. Минск: Институт торфа АН БССР, 1983. 103 с.
16. Томина Е.В., Ходосова Н.А., Мануковская В.Е., Лукин А.Н., Корчагина А.Ю. Влияние ультразвуковой обработки на сорбционно-поверхностные характеристики березового биоугля // Сорбционные и хроматографические процессы. 2023. Т. 23. № 3. С. 384–394.
17. Холодов В.А., Фарходов Ю.Р., Ярославцева Н.В., Айдинев А.Ю., Лазарев В.И., Ильин Б.С., Куликова Н.А. Термолабильное и термостабильное органическое вещество черноземов разного землепользования // Почвоведение. 2020. № 8. С. 970–982. DOI: <https://doi.org/10.31857/s0032180x20080080>.
18. Швартау В.В., Вирыч П.А., Маковейчук Т.И., Артеменко А.Ю. Кальций в растительных клетках // Вестник Днепропетровского университета. Серия: Биология. Экология. 2014. Т. 22. № 1. С. 19–32.
19. Яковлев Е.Ю., Дружинина А.С., Дружинин С.В., Бедрина Д.Д., Орлов А.С., Спиров Р.К., Жуковская Е.В. Оценка физико-химических параметров и распределения металлов в верховом болоте Архангельской области // Успехи современного естествознания. 2020. № 5. С. 115–120.
20. Яконовская Т.Б. Особенности применения доходного подхода к оценке стоимости бизнеса предприятий торфяной отрасли при выборе стратегических решений (часть 2) // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия: Науки об обществе и гуманитарные науки. 2024. № 1 (36). С. 78–90. DOI: <https://doi.org/10.46573/2409-1391-2024-1-78-90>.
21. Ahmed N., Zhang B., Chachar Z., Li J., Xiao G., Wang, Q., Tu P. Micronutrients and their effects on horticultural crop quality, productivity and sustainability // Scientia Horticulturae. 2024. Vol. 323. P. 112512. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112512>.
22. Arbuzov S.I., Maslov S.G., Finkelman R.B., Mezhibor A.M., Ilenok S.S., Blokhin M.G., Peregudina E.V. Modes of occurrence of rare earth elements in peat from Western Siberia // Journal of Geochemical Exploration. 2018. Vol. 184. P. 40–48. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2017.10.012>.
23. Beaulne J., Garneau M., Magnan G., Boucher É. Peat deposits store more carbon than trees in forested peatlands of the boreal biome // Scientific Reports. 2021. Vol. 11. No. 1. P. 2657. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-82004-x>.
24. Biederman L.A., Harpole W.S. Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: a meta-analysis // GCB bioenergy. 2013. Vol. 5. No. 2. P. 202–214. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcbb.12037>.
25. Bu X., Ji H., Ma W., Xian T., Zhou Z., Wang F., Xue J. Effects of biochar as

a peat-based substrate component on morphological, photosynthetic and biochemical characteristics of *Rhododendron delavayi* Franch // *Scientia Horticulturae*. 2022. Vol. 302. P. 111148. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111148>.

26. *Chai W., Wang F., Miao Z., Che N.* Chai W. Hydrophilic porous activated biochar with high specific surface area for efficient capacitive deionization // *Desalination and Water Treatment*. 2024. Vol. 320. P. 100617. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100617>.

27. *Chrysargris A., Prasad M., Kavanagh A., Tzortzakis N.* Biochar type, ratio, and nutrient levels in growing media affects seedling production and plant performance // *Agronomy*. 2020. Vol. 10. No. 9. P. 1421. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy10091421>.

28. *De Melo C.A., De Oliveira L.K., Goveia D.* Enrichment of tropical peat with micronutrients for agricultural applications: evaluation of adsorption and desorption processes // *Journal of the Brazilian Chemical Society*. 2014 Vol. 25. P. 36–49. DOI: <https://doi.org/10.5935/0103-5053.20130265>.

29. *De Tender C.A., Debode J., Vandecasteele B., D'Hose T., Cremelie P., Haegeman A., Maes M.* Biological, physicochemical and plant health responses in lettuce and strawberry in soil or peat amended with biochar // *Applied Soil Ecology*. 2016. Vol. 107. P. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2016.05.001>.

30. *Handiso B., Pääkkönen T., Wilson B.P.* Effect of pyrolysis temperature on the physical and chemical characteristics of pine wood biochar // *Waste Management Bulletin*. 2024. Vol. 2. No. 4. P. 281–287. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wmb.2024.11.008>.

31. *Huang L., Niu G., Feagley S.E., Gu M.* Evaluation of a hardwood biochar and two composts mixes as replacements for a peat-based commercial substrate // *Industrial Crops and Products*. 2019. Vol. 129. P. 549–560. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.12.044>.

32. *Kabir E., Kim K.H., Kwon E.E.* Biochar as a tool for the improvement of soil and environment // *Frontiers in Environmental Science*. 2023. Vol. 11. P. 1324533. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1324533>.

33. *Lévesque V., Jeanne T., Dorais M., Ziadi N., Hogue R., Antoun H.* Biochars improve tomato and sweet pepper performance and shift bacterial composition in a peat-based growing medium // *Applied soil ecology*. 2020. Vol. 153. P. 103579. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103579>.

34. *Lima J.Z., Ogura A.P., Espíndola E.L.G., da Silva E.F., Rodrigues V.G.S.* Post-sorption of Cd, Pb, and Zn onto peat, compost, and biochar: Short-term effects of ecotoxicity and bioaccessibility // *Chemosphere*. 2024. Vol. 352. P. 141521. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141521>.

35. *Liu Q., Zang G. L., Zhao Q.* Removal of copper ions by functionalized

- biochar based on a multicomponent Ugi reaction // RSC advances. 2021. Vol. 11. No. 42. P. 25880–25891. DOI: <http://dx.doi.org/10.1039/D1RA04156H>.
36. Margenot A.J., Griffin D.E., Alves B.S., Rippner D.A., Li C., Parikh S.J. Substitution of peat moss with softwood biochar for soil-free marigold growth // Industrial Crops and Products. 2018. Vol. 112. P. 160–169. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.10.053>.
37. Méndez A, Paz-Ferreiro J, Gil E, Gascó G. The effect of paper sludge and biochar addition on brown peat and coir based growing media properties // Scientia Horticulturae. 2015. Vol. 193. P. 225–230. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.07.032>.
38. Nieto A., Gasco G., Paz-Ferreiro J., Fernández J. M., Plaza C., Mendez A. The effect of pruning waste and biochar addition on brown peat based growing media properties // Scientia Horticulturae. 2016. Vol. 199. P. 142–148. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.12.012>.
39. Osman A.I., Fawzy S., Farghali M., El-Azazy M., Elgarahy A.M., Fahim R.A. Biochar for agronomy, animal farming, anaerobic digestion, composting, water treatment, soil remediation, construction, energy storage, and carbon sequestration: a review // Environmental Chemistry Letters. 2022. Vol. 20. No. 4. P. 2385–2485. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01424-x>.
40. Qian T., Wang L., Le C., Zhou Y. Low-temperature-steam activation of phosphorus in biochar derived from enhanced biological phosphorus removal (EBPR) sludge // Water Research. 2019. Vol. 161. P. 202–210. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.06.008>.
41. Singh Yadav S.P., Bhandari S., Bhatta D., Poudel A., Bhattacharai S., Yadav P., Oli B. Biochar application: A sustainable approach to improve soil health // Journal of Agriculture and Food Research. 2023. Vol. 11. P. 100498. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100498>.
42. Stanton C., Sanders D., Krämer U., Podar D. Zinc in plants: Integrating homeostasis and biofortification // Molecular Plant. 2022. Vol. 15. No. 1. P. 65–85. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.molp.2021.12.008>.
43. Tammeorg P., Brandstaka T., Simojoki A., Helenius J. Nitrogen mineralisation dynamics of meat bone meal and cattle manure as affected by the application of softwood chip biochar in soil // Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh. 2012. Vol. 103. No. 1. P. 19–30. DOI: <https://doi.org/10.1017/S1755691012000047>.
44. Vasilevich R., Vasilevich M., Lodygin E., Abakumov E. Geochemical characteristics of the vertical distribution of heavy metals in the hummocky peatlands of the cryolithozone // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2023. Vol. 20. No. 5. P. 3847. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph20053847>.

45. Vaughn S.F., Kenar J.A., Thompson A.R., Peterson S.C. Comparison of biochars derived from wood pellets and pelletized wheat straw as replacements for peat in potting substrates // Industrial crops and products. 2013. Vol. 51. P. 437–443. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.10.010>.
46. Wang D., Li B., Yang H., Zhao C., Yao D., Chen H. Influence of biochar on the steam reforming of biomass volatiles: effects of activation temperature and atmosphere // Energy & Fuels. 2019. Vol. 33. No. 3. P. 2328–2334. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.8b04412>.
47. Wang L., Olsen M.N., Moni C., Dieguez-Alonso A., de la Rosa J.M., Stenrød M., Mao L. Comparison of properties of biochar produced from different types of lignocellulosic biomass by slow pyrolysis at 600 C // Applications in Energy and Combustion Science. 2022. Vol. 12. P. 100090. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jaecs.2022.100090>.
48. Yan J., Yu P., Liu C., Li Q., Gu M. Replacing peat moss with mixed hardwood biochar as container substrates to produce five types of mint (*Mentha* spp.) // Industrial Crops and Products. 2020. Vol. 155. P. 112820. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112820>.
49. Zhang D., Peng Q., Yang R., Lin W., Wang H., Zhou W., Ouyang L. Slight carbonization as a new approach to obtain peat alternative // Industrial Crops and Products. 2023. Vol. 202. P. 117041. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117041>.
50. Zulfiqar F., Allaire S.E., Akram N.A., Méndez A., Younis A., Peerzada A.M., Wright S.R. Challenges in organic component selection and biochar as an opportunity in potting substrates: a review // Journal of Plant Nutrition. 2019. Vol. 42. No. 11–12. P. 1386–1401. DOI: <https://doi.org/10.1080/01904167.2019.1617310>.

## REFERENCES

1. Akimova A.S., Krugovorot soedinenii fosfora v pochve (The cycle of phosphorus compounds in soil), *International Research Journal*, 2023, Vol. 134, No. 8, pp. 1–4, DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.134.38>.
2. Beliatsky V.N., Osnovy metodov atomno-absorbtionnoi i atomno-emissionnoi spektroskopii (Fundamentals of atomic absorption and atomic emission spectroscopy). Minsk: BSMU, 2015, 40 p.
3. V Tyumeni budut razvivat' dobychu torfa vmeste s predpriyatiyami Belarusi. URL: <https://tyumen-news.net/economy/2024/05/23/377097.html>.
4. Vasilevich R.S., Makro- i mikroelementnyi sostav merzlotnykh bugristykh torfyanikov lesotundry evropeiskogo severo-vostoka Rossii (Macro- and microelement composition of permafrost hummocky peatlands of the

- European northeast of Russia), *Geokhimiya*, 2018, No. 12, pp. 1158– 1172, DOI: <https://doi.org/10.1134/s0016752518100126>.
5. Kabata-Pendias A., Pendias Kh., *Mikroelementy v pochvakh i rasteniyakh*, Moscow: Mir, 1989. 439 p.
6. Karpenko L.V., Mikroelementnyi sostav torfyanykh pochv Nizhnego Priangar'ya (Microelement composition of peat soils of the Lower Angara region), *Vestnik Krasnoyarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2009, No. 4, pp. 139–144.
7. Mikova N.M., Ivanov I.P., Zhizhaev A.M., Kuznetsov B.N., Vliyanie termoshchelochnoi aktivatsii NaOH kory listvennitsy na strukturu i sorbsionnye svoistva poluchennykh aktivnykh uglei (Influence of thermalkali activation of NaOH bark of larch on structure and sorption properties of the received active carbon), *Zhurnal Sibirskogo federalnogo universiteta. Khimiya*, 2024, No. 17 (3), pp. 407–418.
8. Moiseeva E.V., Potapova I.A., Atomno-absorbsionnoe opredelenie rtuti v moche metodom kholodnogo para s ispol'zovaniem rtutno-gidridnoi pristavki (Atomic absorption determination of mercury in urine by the method of cold vapor with the use of mercury hydride attachment), *Meditina truda i promyshlennaya ekologiya*, 2019, Vol. 59, No. 10, pp. 887–891, DOI: <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2019-59-10-887-891>.
9. Moskovchenko D.V., Romanenko E.A., Elemental composition of soils of the Pur-Taz interfluve, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2020, Vol. 103, pp. 51–84. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-103-51-84>.
10. Ponomarev K.O., Dryagina A.A., Filimonenko E.A., Dimitryuk I.D., Effect of biochars on the concentration of plant-available elements in the soil, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2024, Vol. 120, pp. 265–294, DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2024-120-265-294>.
11. Spirina V.Z., Solov'eva T.P., *Agrokhimicheskie metody issledovaniya pochv, rastenii i udobrenii* (Agrochemical methods of studying soil, plants and fertilizers), Tomsk: TGU, 2014, 336 p.
12. Stepanova V.A., Pokrovskii O.S., Makroelementnyi sostav torfa vypuklykh verkhovykh bolot srednei taigi Zapadnoi Sibiri (Macroelement composition of peat from convex upland bogs of the middle taiga of Western Siberia) (na primere bolotnogo kompleksa “Mukhrino”) (using the example of the Mukhrino bog complex), *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2011, No. 352, pp. 211–214.
13. Tabakaev R.B., Ponomarev K.O., Kalinich I.K. Gaidabrus M.A., Shulaev N.A., Eletskii P.M., Kompleksnaya SVCh-pererabotka vysokozol'nogo burogo ugliya dlya nuzhd energeticheskoi i metallurgicheskoi otrasslei (Complex microwave processing of high-ash brown coal for the needs of the energy and metallurgical industries), *Izvestiya Tomskogo*

- politekhnicheskogo universiteta Inzhiniring georesursov*, 2024, Vol. 335, No. 1, pp. 57–68, DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2024/1/4336>.
14. Timofeeva M.V., Goncharova O.Yu., Matyshak G.V., Bochkova S.D., Kadulin M.S., Carbon leaching from peat soils of the north of Western Siberia under different hydrological conditions, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2024, Vol. 119, pp. 211–241, DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2024-119-211-241>.
15. Tishkovich A.V., Meerovskii A.S., Viryasov G.P. Usyukevich G.A., Barannikova E.V., Torf na udobrenie (Peat as fertilizer), *Nauka i tekhnika*, Minsk: In-t torfa AN BSSR, 1983. 103 p.
16. Tomina E.V., Khodosova N.A., Manukovskaya V.E., Lukin A.N., Korchagina A.Yu., Vliyanie ul'trazvukovoї obrabotki na sorbtionno-poverkhnostnye kharakteristiki berezovogo biouglya (Influence of ultrasonic treatment on sorption-surface characteristics of birch biochar), *Sorbtionnye i khromatograficheskie protsessy*, 2023, Vol. 23, No. 3, pp. 384–394.
17. Kholodov V.A., Farkhodov Yu.R., Yaroslavtseva N.V., Aidiev A.Yu., Lazarev V.I., Il'in B.S., Kulikova N.A., Termolabil'noe i termostabil'noe organicheskoe veshchestvo chernozemov raznogo zemlepol'zovaniya (Thermolabile and thermostable organic matter of chernozems of different land use), *Pochvovedenie*, 2020, No. 8, pp. 970–982, DOI: <https://doi.org/10.31857/s0032180x20080080>.
18. Shvartau V.V., Virych P.A., Makoveichuk T.I., Artemenko A.Yu., Kal'tsii v rastitel'nykh kletkakh (Calcium in plant cells), *Vestnik Dnepropetrovskogo universiteta. Seriya: Biologiya. Ekologiya*, 2014, Vol. 22, No. 1, pp. 19–32.
19. Yakovlev E.Yu., Druzhinina A.S., Druzhinin S.V., Bedrina D.D., Orlov A.S., Spirov R.K., Zhukovskaya E.V., Otsenka fiziko-khimicheskikh parametrov i raspredeleniya metallov v verkhovom bolote Arkhangelskoi oblasti (Assessment of physical and chemical parameters and distribution of metals in the upper bog of the Arkhangelsk region), *Uspekhi sovremennoego estestvoznaniya*, 2020, No. 5, pp. 115–120.
20. Yakonovskaya T.B., Osobennosti primeneniya dokhodnogo podkhoda k otsenke stoimosti biznesa predpriyatiy torfyanoj otrazhli pri vybere strategicheskikh reshenii (chast' 2) (Features of applying the income approach to assessing the value of businesses in the peat industry when choosing strategic solutions (part 2)), *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Nauki ob obshchestve i gumanitarnye nauki*, 2024, No. 1 (36), pp. 78–90, DOI: <https://doi.org/10.46573/2409-1391-2024-1-78-90>.
21. Ahmed N., Zhang B., Chachar Z., Li J., Xiao G., Wang, Q., Tu P., Micronutrients and their effects on horticultural crop quality, productivity and sustainability, *Scientia Horticulturae*, 2024, Vol. 323, P. 112512, DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112512>.

22. Arbuzov S.I., Maslov S.G., Finkelman R.B., Mezhibor A.M., Ilenok S.S., Blokhin M.G., Peregudina E.V., Modes of occurrence of rare earth elements in peat from Western Siberia, *Journal of Geochemical Exploration*, 2018, Vol. 184, pp. 40–48, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2017.10.012>.
23. Beaulne J. Garneau M., Magnan G., Boucher É., Peat deposits store more carbon than trees in forested peatlands of the boreal biome, *Scientific Reports*, 2021, Vol. 11, No. 1, pp. 2657, DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-82004-x>
24. Biederman L.A., Harpole W.S., Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: a meta-analysis, *GCB bioenergy*, 2013, Vol. 5, No. 2, pp. 202–214, DOI: <https://doi.org/10.1111/gcbb.12037>.
25. Bu X., Ji H., Ma W., Xian T., Zhou Z., Wang F., Xue J., Effects of biochar as a peat-based substrate component on morphological, photosynthetic and biochemical characteristics of *Rhododendron delavayi* Franch, *Scientia Horticulturae*, 2022, Vol. 302, pp. 111148, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111148>.
26. Chai W., Wang F., Miao Z., Che N., Chai W., Hydrophilic porous activated biochar with high specific surface area for efficient capacitive deionization, *Desalination and Water Treatment*, 2024, Vol. 320, pp. 100617, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100617>.
27. Chrysargris A., Prasad M., Kavanagh A., Tzortzakis N., Biochar type, ratio, and nutrient levels in growing media affects seedling production and plant performance, *Agronomy*, 2020, Vol. 10, No. 9, pp. 1421, DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy10091421>.
28. De Melo C.A., De Oliveira L.K., Goveia D., Enrichment of tropical peat with micronutrients for agricultural applications: evaluation of adsorption and desorption processes, *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 2014, Vol. 25, pp. 36–49, DOI: <https://doi.org/10.5935/0103-5053.20130265>.
29. De Tender C.A., Debode J., Vandecasteele B., D'Hose T., Cremelie P., Haegeman A., Maes M., Biological, physicochemical and plant health responses in lettuce and strawberry in soil or peat amended with biochar, *Applied Soil Ecology*, 2016, Vol. 107, pp. 1–12, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2016.05.001>.
30. Handiso B., Pääkkönen T., Wilson B.P., Effect of pyrolysis temperature on the physical and chemical characteristics of pine wood biochar, *Waste Management Bulletin*, 2024, Vol. 2, No. 4, pp. 281–287, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wmb.2024.11.008>.
31. Huang L., Niu G., Feagley S.E., Gu M., Evaluation of a hardwood biochar and two composts mixes as replacements for a peat-based commercial substrate, *Industrial Crops and Products*, 2019, Vol. 129, pp. 549–560, DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.12.044>.

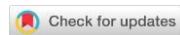
32. Kabir E., Kim K.H., Kwon E.E., Biochar as a tool for the improvement of soil and environment, *Frontiers in Environmental Science*, 2023, Vol. 11, pp. 1324533, DOI: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1324533>.
33. Lévesque V., Jeanne T., Dorais M., Ziadi N., Hogue R., Antoun H., Biochars improve tomato and sweet pepper performance and shift bacterial composition in a peat-based growing medium, *Applied soil ecology*, 2020, Vol. 153, pp. 103579, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103579>.
34. Lima J.Z., Ogura A.P., Espíndola E.L.G., da Silva E.F., Rodrigues V.G.S., Post-sorption of Cd, Pb, and Zn onto peat, compost, and biochar: Short-term effects of ecotoxicity and bioaccessibility, *Chemosphere*, 2024, Vol. 352, pp. 141521, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141521>.
35. Liu Q., Zang G.L., Zhao Q., Removal of copper ions by functionalized biochar based on a multicomponent Ugi reaction // *RSC advances*, 2021, Vol. 11, No. 42, pp. 25880–25891, DOI: <http://dx.doi.org/10.1039/DRA04156H>.
36. Margenot A.J., Griffin D.E., Alves B.S., Rippner D.A., Li C., Parikh S.J., Substitution of peat moss with softwood biochar for soil-free marigold growth, *Industrial Crops and Products*, 2018, Vol. 112, pp. 160–169, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.10.053>.
37. Méndez A., Paz-Ferreiro J., Gil E., Gascó G., The effect of paper sludge and biochar addition on brown peat and coir based growing media properties, *Scientia Horticulturae*, 2015, Vol. 193, pp. 225–230, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.07.032>.
38. Nieto A., Gasco G., Paz-Ferreiro J., Fernández J.M., Plaza C., Mendez A., The effect of pruning waste and biochar addition on brown peat based growing media properties, *Scientia Horticulturae*, 2016, Vol. 199, pp. 142–148, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.12.012>.
39. Osman A.I., Fawzy S., Farghali M., El-Azazy M., Elgarahy A.M., Fahim R.A, Biochar for agronomy, animal farming, anaerobic digestion, composting, water treatment, soil remediation, construction, energy storage, and carbon sequestration: a review, *Environmental Chemistry Letters*, 2022, Vol. 20, No. 4, pp. 2385–2485, DOI: <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01424-x>.
40. Qian T., Wang L., Le C., Zhou Y., Low-temperature-steam activation of phosphorus in biochar derived from enhanced biological phosphorus removal (EBPR) sludge, *Water Research*, 2019, Vol. 161, pp. 202–210, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.06.008>.
41. Singh Y.S.P., Bhandari S., Bhatta D., Poudel A., Bhattarai S., Yadav P., Oli B., Biochar application: A sustainable approach to improve soil health, *Journal of Agriculture and Food Research*, 2023, Vol. 11, pp. 100498, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100498>.
42. Stanton C., Sanders D., Krämer U., Podar D., Zinc in plants: Integrating

- homeostasis and biofortification, *Molecular Plant*, 2022, Vol. 15, No. 1, pp. 65–85, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.molp.2021.12.008>.
43. Tammeorg P., Brandstaka T., Simojoki A., Helenius J., Nitrogen mineralisation dynamics of meat bone meal and cattle manure as affected by the application of softwood chip biochar in soil, *Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 2012, Vol. 103, No. 1, pp. 19–30, DOI: <https://doi.org/10.1017/S1755691012000047>.
44. Vasilevich R., Vasilevich M., Lodygin E., Abakumov E., Geochemical characteristics of the vertical distribution of heavy metals in the hummocky peatlands of the cryolithozone, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2023, Vol. 20, No. 5, pp. 3847, DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph20053847>.
45. Vaughn S.F., Kenar J.A., Thompson A.R., Peterson S.C., Comparison of biochars derived from wood pellets and pelletized wheat straw as replacements for peat in potting substrates, *Industrial crops and products*, 2013, Vol. 51, pp. 437–443, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.10.010>.
46. Wang D., Li B., Yang H., Zhao C., Yao D., Chen H., Influence of biochar on the steam reforming of biomass volatiles: effects of activation temperature and atmosphere //*Energy & Fuels*, 2019, Vol. 33, No. 3, P. 2328–2334, DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.8b04412>.
47. Wang L., Olsen M. N., Moni C., Dieguez-Alonso A., de la Rosa J. M., Stenrød M., Mao L., Comparison of properties of biochar produced from different types of lignocellulosic biomass by slow pyrolysis at 600 C, *Applications in Energy and Combustion Science*, 2022, Vol. 12, pp. 100090, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jaecs.2022.100090>.
48. Yan J., Yu P., Liu C., Li Q., Gu M., Replacing peat moss with mixed hardwood biochar as container substrates to produce five types of mint (*Mentha* spp.), *Industrial Crops and Products*, 2020, Vol. 155, pp. 112820, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112820>.
49. Zhang D., Peng Q., Yang R., Lin W., Wang H., Zhou W., Ouyang L., Slight carbonization as a new approach to obtain peat alternative, *Industrial Crops and Products*, 2023, Vol. 202, pp. 117041, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117041>.
50. Zulfiqar F., Allaire S.E., Akram N.A., Méndez A., Younis A., Peerzada A.M., Wright, S.R., Challenges in organic component selection and biochar as an opportunity in potting substrates: a review, *Journal of Plant Nutrition*, 2019, Vol. 42, No. 11–12, pp. 1386–1401, DOI: <https://doi.org/10.1080/01904167.2019.1617310>.

УДК 631.4



DOI: 10.19047/0136-1694-2025-126-270-290



#### Ссылки для цитирования:

Ковалева Е.И., Трофимов С.Я. Модель установления нормативов качества почв по содержанию нефтезагрязняющих веществ // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2025. Вып. 126. С. 270-290.  
DOI: 10.19047/0136-1694-2025-126-270-290

#### Cite this article as:

Kovaleva E.I., Trofimov S.Ya., The model for establishing soil quality standards for the content of oil contaminants, Dokuchaev Soil Bulletin, 2025, V. 126, pp. 270-290, DOI: 10.19047/0136-1694-2025-126-270-290

#### Благодарность:

Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, (тема № 121040800147-0 “Почвенные информационные системы и оптимизация использования почвенных ресурсов”).

#### Acknowledgments:

The study was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (topic No. 121040800147-0 “Soil information systems and optimization of soil resource use”).

## Модель установления нормативов качества почв по содержанию нефтезагрязняющих веществ

© 2025 г. Е. И. Ковалева\*, С. Я. Трофимов

МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия,  
119991, Москва, Ленинские горы, 1, стр. 12,

\*<https://orcid.org/0000-0001-8434-1395>, e-mail: [katekov@mail.ru](mailto:katekov@mail.ru).

Поступила в редакцию 25.01.2025, после доработки 10.03.2025,  
принята к публикации 13.11.2025

**Резюме:** Рассмотрены проблемы экологического нормирования содержания загрязняющих веществ в почвах, в том числе отсутствие методик установления нормативов качества и эталонных участков, выбор оценочных показателей, описывающих функционирование почв, критерии их оценки. Представлена методика разработки нормативов качества почв по содержанию загрязняющих веществ. Проведен анализ нормативно-правовых основ экологического нормирования содержания

загрязняющих веществ в почвах. Показано, что отсутствует ряд методических документов для выполнения требований в части проведения рекультивации земель. Предлагается модель установления нормативов качества почв по содержанию загрязняющих веществ на примере нефтезагрязнения. Обоснование значений нормативов качества почв производится с учетом выполнения ими экологических функций. Экологическими нормативами качества почв по содержанию нефтепродуктов является величина, соответствующая предельно допустимому уровню значений по результатам лабораторных испытаний, с учетом фона, под которым понимается состояние почвы, определяемое природными особенностями территорий и обусловленное естественными процессами. Для определения нормативов качества почв по содержанию загрязняющих веществ предлагается имитационное моделирование с использованием различных показателей вредности. Для почв земель лесного фонда, промышленности и иного специального назначения, запаса, водоохраных зон применяются миграционный водный показатель вредности и биоиндикационные показатели, отражающие способность почвы выполнять основные экологические функции на землях перечисленных категорий. Показателями оценки экологического состояния почв в условиях антропогенного воздействия являются характеристики почв, демонстрирующих способность почвы выполнять экологические функции. Допустимые значения этих показателей устанавливаются при изучении зависимости “состояние – воздействие”, “доза – эффект”, при оценке поступления компонентов нефти или нефтепродуктов в сопредельные среды в количествах, вызывающих токсическое воздействие для биоты. Пороговым значением при изучении зависимостей “состояние – воздействие”, “доза – эффект” является на графике точка качественных изменений состояния почв в сопредельных средах.

**Ключевые слова:** нефтепродукты; функции почв; рекультивация почв; предельно допустимые значения; микробиологическая активность; фитотестирование.

## The model for establishing soil quality standards for the content of oil contaminants

© 2025 E. I. Kovaleva<sup>\*</sup>, S. Ya. Trofimov

*Lomonosov Moscow State University,  
12 Bld., 1 Leninskie Gori, Moscow 119991, Russian Federation,*  
<sup>\*</sup><https://orcid.org/0000-0001-8434-1395>, e-mail: [katekov@mail.ru](mailto:katekov@mail.ru).

*Received 25.01.2025, Revised 10.03.2025, Accepted 13.11.2025*

**Abstract:** The problems of environmental regulation of oil contaminants in soils are considered. A methodology for developing soil quality standards for the content of contaminants is presented. The analysis of the regulatory framework for environmental regulation of contaminants in soils has been carried out. It is shown that there is a lack of methodological documents for meeting the requirements regarding land reclamation. A model for setting soil quality standards in terms of the content of contaminants is proposed using the example of oil pollution. The justification for the establishment of soil quality standards is based on the ecological functions performed by the soil. Based on the grouping of soil horizons in the framework of ongoing scientific research, the values of quality standards are differentiated for soil horizons of the selected types and subtypes of soils by groups. The environmental standards of soil quality for the content of petroleum products are parameters set at the maximum permissible level of values obtained as a result of laboratory tests – absolute normative values, taking into account the natural background ones, which refers to the soil condition determined by the natural features of the territories and caused by natural environmental processes. To determine the soil quality standards for the content of pollutants, simulation modeling is proposed using various indicators of harmfulness, reflecting 1) the probability of migration of pollutants, for example, oil and products of its transformation from soil to adjacent media (components of the natural environment) into surface and groundwater (migratory aquatic hazard index); 2) the conditions of biota functioning (bioindicators), reflecting the ability of the soil to perform the ecological functions of soils. The indicators for assessing the ecological condition of oil-affected soils are soil characteristics that reflect the ability of the soil to perform ecological functions. Acceptable values of these indicators are established when studying the relationship “state – effect”, “dose – effect”, and assessing the intake of oil or petroleum product components into adjacent environments in quantities that cause toxic effects on biota. The threshold value for studying the relationship “state – impact”, “dose – effect” is the point of qualitative changes in the state of soils and adjacent environment on the graph.

**Keywords:** petroleum hydrocarbons; soil functions; soil remediation; micrbiological activity; phytotesting.

## ВВЕДЕНИЕ

Современная экологическая ситуация в Российской Федерации характеризуется значительными последствиями прошлой экономической деятельности (Основы государственной политики...,

2012), что определяет необходимость восстановления нарушенных экосистем. Решение данной задачи предусматривает использование различных механизмов, в том числе, реализацию программ, направленных на ликвидацию последствий негативного воздействия хозяйственной деятельности на компоненты природной среды. В государственном докладе (2022) подчеркивается, что деградация земель в настоящее время представляет одну из важнейших экологических проблем, решение которой направлено на сохранение благоприятной окружающей среды, биологического разнообразия и природных ресурсов; предотвращение негативного воздействия на окружающую среду; восстановление нарушенных экосистем. Для оценки состояния почв, их восстановления необходимо иметь отправную точку, относительно которой реализуется экологическое нормирование и устанавливаются нормативы качества.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектами исследования являются почвы земель лесного фонда, промышленности и иного специального назначения, запаса, а также земельные участки вышеперечисленных земель в границах водоохраных зон. В работе применялись общенаучные и теоретические методы исследования, такие как анализ и обобщение. Предметом исследования является экологическое нормирование с учетом требований нормативно-правовых документов в области окружающей среды. В качестве методологической основы разработки научных подходов к установлению нормативов качества почв (земель), “экологической” группировки почв принята методология российской школы генетического почвоведения, устанавливающего связь строения, свойств, закономерностей географического распространения почв с факторами почвообразования (почвообразующие породы, климат, рельеф, растительность, время, антропогенная деятельность человека); учитывается связующая роль почвы с компонентами природной среды, основы функционирования почв в экосистемах.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Экологическое нормирование осуществляется в целях сохранения благоприятной окружающей среды и обеспечения экологической безопасности государственного регулирования хозяйственной деятельности для предотвращения и (или) снижения ее негативного воздействия на окружающую среду (ФЗ “Об охране окружающей среды”). Нормирование в области охраны окружающей среды заключается в установлении нормативов качества окружающей среды, нормативов допустимого воздействия на окружающую среду при осуществлении хозяйственной деятельности. Нормативы качества окружающей среды устанавливаются для оценки состояния окружающей среды в целях обеспечения благоприятных условий жизнедеятельности человека, рационального использования природных ресурсов, сохранения естественных экологических систем, генетического фонда растений, животных и других организмов. Нормативы качества устанавливаются для химических, физических и биологических показателей состояния окружающей среды. Одним из требований к разработке нормативов качества является проведение научно-исследовательских работ для их обоснования.

Порядок установления нормативов качества определен постановлением Правительства РФ от 13.02.2019 № 149 “О разработке, установлении и пересмотре нормативов качества окружающей среды для химических и физических показателей состояния окружающей среды, а также об утверждении нормативных документов в области охраны окружающей среды, устанавливающих технологические показатели наилучших доступных технологий” (далее по тексту постановление Правительства РФ от 13.02.2019 № 149). Нормативы качества разрабатываются и устанавливаются для отдельных компонентов природной среды, в том числе для почв (земель). Следовательно, антропогенное воздействие на окружающую среду регулируется в соответствии с природоохранным законодательством путем соблюдения нормативов допустимого антропогенного воздействия, при которых обеспечивается ненарушение нормативов качества окружающей среды. Нормативы качества почв (земель) разрабатываются и устанавливаются с

учетом природных особенностей территорий и категорий земель в соответствии с земельным законодательством Российской Федерации (Земельный кодекс).

Согласно постановлению Правительства РФ от 13.02.2019 № 149, для оценки качества почв категорий земель сельскохозяйственного назначения и земель населенных пунктов, земельных участков зон санитарной охраны источников питьевого и хозяйствственно-бытового водоснабжения, курортных зон, а также для почв всех категорий земель по химическим веществам неприродного происхождения, устанавливаются гигиенические нормативы, разрабатываемые и утверждаемые Федеральной службой по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека в соответствии с законодательством в области обеспечения санитарно-эпидемиологического благополучия населения.

Для оценки качества почв категорий земель и земельных участков, не перечисленных выше, а также для почв всех категорий по химическим веществам природного происхождения устанавливаются экологические нормативы качества почв (земель) для выделяемых однородных в почвенно-экологическом отношении территорий и определяются в соответствии с методиками, утвержденными Минприродой России.

В СанПин 1.2.3685-21) приведены санитарно-гигиенические нормативы – предельно допустимые концентрации (ПДК), являющиеся одновременно и нормативами качества. Установлены ПДК и ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) химических веществ (56 веществ) для почв населенных мест и сельскохозяйственных угодий. ПДК металлов разработаны для валовых и подвижных форм (экстрагируемые ацетатно-аммонийным буферным раствором). Подвижные формы металлов демонстрируют как подвижность металлов в природной среде, так и их доступность для растений. Однако нормативы для металлов установлены хаотично, не для всех металлов одновременно. Это затрудняет проведение сравнения для полученных данных по металлам и для комплексной оценки степени загрязнения почвы и уровня ее токсичности. Для тяжелых металлов расчетным методом установлены ОДК для кадмия, меди, никеля, свинца, цинка, мышьяка, которые дифференцированы по их устойчивости к химическому загрязнению.

нию (учитывается гранулометрический состав,  $pH_{KCl}$ ). Отметим, что нормативы ОДК не учитывают региональные особенности территорий, естественный геохимический фон; они применяются на всей территории страны.

Для почв земель лесного фонда, промышленности и иного специального назначения (разрешенное использование – производственная деятельность), а также запаса должны устанавливаться экологические нормативы, утверждаемые Министерством природных ресурсов и экологии Российской Федерации (постановление Правительства РФ от 13.02.2019 № 149).

Особая ситуация сложилась при оценке уровня загрязнения почв нефтью и нефтепродуктами, а также при приемке земель после рекультивации нефтезагрязненных почв. Нормативы качества почв по содержанию нефти и нефтепродуктов отсутствуют в санитарно-гигиеническом нормировании, что затрудняет оценку качества почв в условиях нефтезагрязнения, выбор наиболее эффективных мероприятий по снижению уровня загрязнения, приемку рекультивированных земель. В настоящее время установлены ПДК для отдельных веществ (табл. 1), входящих в состав нефти/нефтепродуктов, поскольку нефть представляет собой сложную смесь индивидуальных веществ (Петров, 1984).

До 2021 г. нормативной правовой базой были сформированы основы для разработки нормативов по содержанию нефти и продуктов ее трансформации для почв – нормативы остаточного содержания нефти в почвах (ДОСНП), которые разрабатывались на основе проведения научно-исследовательских работ и утверждались нормативными правовыми актами субъектов Российской Федерации в порядке, установленном на федеральном уровне. Нормативы ДОСНП разрабатывались в соответствии с положениями Приказа МПР РФ от 12 сентября 2002 г. № 574 “Об утверждении временных рекомендаций по разработке и введению в действие нормативов допустимого остаточного содержания нефти и продуктов ее трансформации в почвах после проведения рекультивационных и иных восстановительных работ” (далее по тексту – Приказ № 574).

**Таблица 1. ПДК компонентов нефти (нефтепродуктов) согласно СанПиНу 1.2.3685-21**

**Table 1. MAC of oil components (oil products) according to SanPiN 1.2.3685-21**

№ п/п	Наименование вещества	Формула	Величина ПДК/ОДК с учетом фона (кларка), мг/кг	Лимитирующий показатель вредности
1.	Бенз/a/пирен	C <sub>20</sub> H <sub>12</sub>	0.02/	общесанитарный
2.	Бензин		0.1/	воздушно-миграционный
3.	Бензол	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	0.3/	воздушно-миграционный
4.	Диметилбензолы (1,2-диметилбензол; 1,3-диметилбензол; 1,4- диметилбензол)	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	0.3/	транслокационный
5	Метилбензол	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	0.3/	воздушно-миграционный
6	(1-метилэтил) бензол	C <sub>9</sub> H <sub>10</sub>	0.5/	воздушно-миграционный
7.	(1-метилэтил) бензол	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	0.5/	воздушно-миграционный
8.	(1-метилэтил) бензол + (1- метилэтил) бензол	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub> +C <sub>9</sub> H <sub>10</sub>	0.5/	воздушно-миграционный
9.	Этенилбензол	C <sub>8</sub> H <sub>8</sub>	0.1/	воздушно-миграционный

Согласно Приказу № 574, нормативы ДОСНП применялись при разработке и экспертизе технологий, материалов, оборудования и иных средств ликвидации загрязнения нефтью, проектов рекультивации или материалов по консервации земель, подвергшихся загрязнению нефтью, а также при приемке земельных участков после проведения рекультивационных и иных восстановительных работ. Данный документ с января 2021 г. является неактуальным ввиду утраты силы постановления Правительства РФ от 15 апреля 2002 г. № 240 “О порядке организации мероприятий по предупреждению и ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов на территории Российской Федерации”. Нормативы ДОСНП являются действующими в некоторых субъектах Российской Федерации, например: ХМАО-Югра, НАО, Ставропольский край, Пермский край, Республика Татарстан, Республика Чувашия, до момента их отмены.

Экологическими нормативами качества почв являются значения химических, биологических, физических показателей их состояния, которые устанавливаются на предельно допустимом уровне значений, полученных на основании результатов лабораторных испытаний – абсолютные нормативные значения, или на уровне допустимого отклонения от значений показателей естественного (природного) фона, под которым понимается состояние почвы, определяемое природными особенностями территорий и естественными процессами.

Постановлением Правительства РФ № 149 закреплены требования по обоснованию значений (интервал допустимого отклонения от значений) показателей природного фона территорий на эталонных участках, критерии которых устанавливаются методиками. Экологические нормативы качества почв (земель) разрабатываются для выделяемых однородных в почвенно-экологическом отношении территорий и определяются в соответствии с методиками, утверждаемыми Министерством природных ресурсов и экологии Российской Федерации. Указанные методики на сегодняшний день не разработаны.

С целью охраны окружающей среды для природопользователей введено требование по восстановлению нарушенных и загрязненных земель (ФЗ “Об охране окружающей среды”, Земель-

ный кодекс). Рекультивация земель должна обеспечивать восстановление земель до состояния, пригодного для их использования в соответствии с целевым назначением и разрешенным использованием, путем обеспечения соответствия качества земель нормативам качества окружающей среды (ОС) для почв (земель), в том числе региональным. При отсутствии введенных нормативов качества окружающей среды для почв (земель) (для конкретного загрязняющего вещества) значениям концентраций загрязняющих веществ, в отношении которых применяются меры государственного регулирования в области охраны окружающей среды, применяются нормативы, используемые на сопредельной территории аналогичного целевого назначения и вида использования (Постановление Правительства РФ от 29.05.2025 № 781). Выполнить требование по рекультивации почв земель лесного фонда, промышленности и иного специального назначения, запаса до нормативов качества ОС для почв невозможно ввиду отсутствия как методик по установлению нормативов качества, так и самих нормативов качества почв. Требование по восстановлению земель до значений концентрации загрязняющих веществ на сопредельных территориях не учитывает геоморфологическую привязку участков и тип почв, что будет вызывать еще больше споров и вопросов.

### **Методические подходы к установлению нормативов качества почв по содержанию загрязняющих веществ**

В понимании авторов, в рамках экологического нормирования качество почв (земель) оценивается с учетом выполняемых почвой экологических функций (Ковда, 1985; Добровольский, Никитин, 1990). Сохранение природного разнообразия почв, предотвращение их деградации при ведении хозяйственной деятельности, обеспечение “здоровья” почв достигается за счет выполнения почвой своих функций в экосистемах (Трофимов, 2013; Соколов и др. 2020; Ковалева и др., 2016, 2024).

Экологическое состояние почв, подверженных антропогенному воздействию, оценивается путем их влияния на сопредельные природные среды, а также условия обитания биоты, благоприятные условия жизни человека, т. е. “здравье” почвы. Допу-

стимые значения этих показателей устанавливаются при изучении зависимости “состояние – воздействие” посредством нахождения качественных изменений состояния почв, имеющих решающее значение при определении допустимого изменения их экологического состояния и качества (Воробейчик и др., 1994; Ковалева и др., 2016, 2017, 2023, 2024; Kovaleva et al., 2021).

*Рассмотрим подходы к установлению норматива качества почв на примере распространенного вида загрязнителя – нефтепродуктов.* Под нефтепродуктами в настоящей работе понимаются нефтяные углеводороды, отделенные в процессе их экстрагирования от сопутствующих органических соединений других классов. В гигиеническом нормировании химических веществ в почвах предложены показатели вредности (Методические рекомендации, 1982). Для определения нормативов качества почв по содержанию нефтепродуктов на уровне категорий земель предлагается применять различные показатели вредности, отражающие вероятность миграции загрязняющих веществ из почвы в сопредельные среды (компоненты природной среды (Трофимов, 2013)): в поверхностные и подземные воды – миграционный водный показатель (Ковалева и др., 2021, 2023), в растения – транслокационный показатель (Ковалева и др., 2019, 2022, 2023). Для оценки условий функционирования биоты используются биоиндикационные показатели, отражающие способность почвы выполнять экологические функции почв (Ковалева и др., 2016, 2024). В таблице 2 приведен блок для изучения биогеоценотических функций почв в условиях нефтезагрязнения и оценочные показатели для анализа способности функционирования почвы.

### **Оценка сорбционной способности почв по отношению к нефтепродуктам**

Физико-химические функции почв отвечают за сорбцию веществ, поступающих в почвы, в том числе нефтепродукты, и сорбцию почвенных микроорганизмов, обитающих в почве и участвующих, в том числе, в процессах биодеструкции нефтепродуктов.

**Таблица 2.** Некоторые биогеоценотические функции и оценочные показатели для изучения почв в условиях нефтезагрязнения

**Table 2.** Some biogeocenotic functions and evaluation indicators for studying soils under oil pollution conditions

Биогеоценотические функции почв	Функции	Тип функции	Подфункции	Оценочный показатель
Физико-химические биологическая и биохимическая активность почвы	Физические	Жизненное пространство	Сорбционная способность почв	Характеристика торфа / гранулометрический состав, содержание органического вещества, емкость катионного обмена
			Среда обитания живых организмов	Фитотестирование Биотестирование Почвенная мезофауна
	Биологическая и биохимическая активность почвы	Способность к трансформации углерода		Базальное и субстрат-индуцированное дыхание
			Регулирование газообмена с атмосферой	
		Азотный цикл		Азотфиксация Денитрификация
		Интенсивность биохимических процессов		Ферментативная активность
		Комбинированные циклы		Мультиsubstrатное тестирование
		Функциональное разнообразие микробиоты		

Показатели, характеризующие сорбционную способность: торф / гранулометрический состав; содержание органического вещества / потеря при прокаливании, емкость катионного обмена для органо-минеральных и минеральных почв.

Группировка почвенных горизонтов для установления дифференцированных значений нормативов качества почв осуществляется на основании сорбционных свойств почв: выделяются органогенные, органо-минеральные, минеральные почвы, техноземы (результат рекультивации), реплантоземы с учетом характеристик или гранулометрического состава. Значения нормативов качества почв по содержанию загрязняющих веществ дифференцируются для почвенных горизонтов выделенных типов / подтипов почв.

### **Оценка гидрологической функции. Водный миграционный показатель**

Особенности процессов нефтедобычи и техногенных нарушений определяют необходимость оценки перехода отдельных веществ нефтепродуктов, а также сопутствующих химических веществ, в водную среду с использованием миграционного водного показателя (Трофимов, 2013; Ковалева и др., 2021). Поступление / отсутствие поступления нефтепродуктов в водные среды характеризует способность почвы выполнять гидросферную функцию (гидрологические функции) почв (Ковалева и др., 2017, 2024). Гидрологические функции почвы имеют разнообразное проявление и формы участия (Добровольский, Никитин, 1990): способность быть регулятором состава и режима грунтовых вод; механизмом формирования водного баланса территории и речного стока; геохимическим защитным барьером акваторий; регулятором поступления механических частиц, химических веществ и микроорганизмов на сопредельные территории и среды.

Вспомогательными химическими показателями для оценки способности почв выполнять гидрологические функции являются показатели, позволяющие анализировать реакцию среды фильтрационных вод, имитирующих почвенный раствор и грунтовые воды; количество поступающих в них нефтепродуктов, хлоридов, сульфатов, при различных концентрациях поступившей нефти в почву (Ковалева и др., 2021).

Дополнительным показателем является определение острой токсичности фильтрационных вод из почв методами биотестирования. Для биотестирования рекомендуется использовать не менее двух тест-организмов из разных таксономических групп, например, ракообразные *Ceriodaphnia affinis* и инфузории *Paramecium caudatum* (Терехова, 2022).

### **Биогеоценотические функции. Оценка функциональных параметров. Биоиндикационные показатели**

Интегральные подходы, основанные на достоверной взаимосвязи отклика биоты почв на конкретные химические и физические свойства, характеризующие почву через совокупность разнообразных процессов и функций, а не отдельных показателей, могут выступать инструментом экологического нормирования почв, оценки ее состояния и здоровья. Среди интегральных показателей здоровой почвы, количественно оценивающих ее важнейшие биогеохимические процессы, выделяется потенциальная способность к самоочищению (Глазовская, 1997), в том числе обеспечиваемая деструкторами поллютантов, микробными супрессорами чужеродных геобионтов и почвенно-поглощающим комплексом (Соколов и др., 2020). Используя интегральный подход, можно определить пороговый уровень содержания нефтяных углеводородов, при не превышении которого функционирование почвы поддерживается или направленно восстанавливается через определенный промежуток времени за счет самоочищения (Ковалева и др., 2021).

*Физические функции* характеризуют почву как среду обитания живых организмов: жизненное пространство, жилище и убежище, механическая опора, депо источников возрождения жизни (семян и других зародышей) (Добровольский, Никитин, 1990). Для оценки функции почв как среды обитания используются косвенные методы:

- фитотестирование с использованием семян высших растений двудольных и однодольных;
- биотестирование с использованием почвенной мезофауны;
- биоиндикация путем оценки почвенной мезофауны, например, микроарктропод.

*Химические и биохимические функции* характеризуют почву

как источник питательных элементов и соединений и депо элементов питания, энергии, влаги (Добровольский, Никитин, 1990). Круговорот углерода, азота, водорода, серы и других элементов, их накопление в почве обусловлено протеканием биохимических процессов в результате деятельности микроорганизмов.

*Биологическая активность почвы* определяется наличием в ней почвенных микроорганизмов (микробного сообщества) и их способностью к трансформации углерода, поступающего в почву органического вещества, с выделением диоксида углерода (базальное дыхание (БД) почвы), а также ферментативной активностью почвы (содержанием основных ферментов из группы гидролаз и оксидоредуктаз) как показателя биохимической активности почвы. БД и сопряженные показатели помогают сформулировать критерий функции почвы при регулировании газового режима атмосферы. Активизация нефтеокисляющих микроорганизмов в почве в условиях нефтезагрязнения – пусковой механизм самовосстановления биоты почв как ее биоценотической функции.

Рекомендуемые основные показатели биологической активности почв: микробная биомасса (в пересчете на углерод микробной биомассы), БД почвы как показатель интенсивности трансформации углерода органических веществ в почве.

Исследование почв по показателям азотфиксация, денитрификация позволяет проследить цикл азота в естественных условиях и при нефтяном загрязнении. Поступление азота в растения обеспечивается прокариотными микроорганизмами. Оценка функции микроорганизмов по фиксации атмосферного азота как экологической функции почв важна при установлении нормативов качества почв по содержанию нефтепродуктов.

### **Структурно-функциональная оценка**

Метод мультиsubstrатного тестирования (МСТ) (Горленко, 1995) природных микробных сообществ позволяет получить сведения о негативном воздействии неблагоприятных факторов на почвы. МСТ предполагает использование многомерных параметров функционирования микробных сообществ, оценить комбинированные циклы, функциональное биоразнообразие.

Указанные функциональные показатели могут быть уточне-

ны в ходе исследований.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обоснование норматива качества почв по содержанию нефтепродуктов выполняется по результатам, полученным в исследованиях по водному миграционному и функциональным показателям, путем использования математических моделей, в том числе установления статистически значимого отклонения функционирования почвы ( $p < 0.05$ ) по выбранным функциональным показателям, по сравнению с фоновыми значениями почвы / почвенного горизонта, обладающего идентичными сорбционными свойствами с учетом категории земель и их основного хозяйственного использования (Ковалева и др., 2023). Выбор значения для установления норматива качества почв по содержанию нефтепродуктов производится на основании результатов их аprobирования в натурных условиях. Для земель лесного фонда основой принятия решения о величине норматива качества почв по содержанию нефтепродуктов является создание благоприятных лесорастительных свойств почв.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воробейчик Е.Л., Садыков О.Ф., Фарафонтов М.Г. Экологическое нормирование техногенных загрязнений наземных экосистем (локальный уровень). Екатеринбург: УИФ “Наука”, 1994. 280 с.
2. Глазовская М.А. Методические основы оценки эколого-геохимической устойчивости почв к техногенным воздействиям. М., 1997. 102 с.
3. Горленко М.В. Мультиsubstrатное тестирование почвенных микробных сообществ: Автореф. дис. ... канд. биол. н. М., 1995. 23 с.
4. Государственный доклад о состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2022 году. URL: [https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye\\_doklady/gosudarstvennyy\\_doklad\\_o\\_sostoyanii\\_i\\_ob\\_okhrane\\_okruzhayushchey\\_sredy\\_rossiyskoy\\_federatsii\\_v\\_2022/](https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye_doklady/gosudarstvennyy_doklad_o_sostoyanii_i_ob_okhrane_okruzhayushchey_sredy_rossiyskoy_federatsii_v_2022/).
5. Добропольский Г.В., Никитин Е.Д. Функции почв в биосфере и экосистемах. М.: Наука, 1990. 258 с.
6. Земельный кодекс Российской Федерации от 25.10.2001 № 136-ФЗ – URL: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_33773/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_33773/).

7. Ковалева Е.И., Пукальчик М.А., Яковлев А.С. О возможности применения активности каталазы при экологическом нормировании и оценке нефтезагрязненных почв // Экология и промышленность России. 2016. Т. 20. № 11. С. 26–31.
8. Ковалева Е.И., Яковлев А.С., Николаенко М.Г., Макаров А.О., Макаров А.А. Экологическая оценка нефтезагрязненных почв с использованием энхитреид // Почвоведение. 2017. № 3. С. 1–10.
9. Ковалева Е.И., Яковлев А.С. Экологические функции болотных экосистем (на примере острова Сахалин) // Экология и промышленность России. 2017. Т. 21. № 12. С. 32–37.
10. Ковалева Е.И., Яковлев А.С. Модель экологического нормирования нефтезагрязненных почв по изменению некоторых биогеоценотических функций // Экология и промышленность России. 2018. Т. 22. № 11. С. 34–39.
11. Ковалева Е.И., Яковлев А.С., Пацкевич Е.Б. Нормирование нефтепродуктов в почвах в условиях вегетационного опыта (на примере зональных и интразональных почв острова) // Проблемы агрохимии и экологии. 2019. № 3. С. 60–67.
12. Ковалева Е.И., Демин В.В., Трофимов С.Я. Радиальная миграция нефтепродуктов в почвах о. Сахалин по материалам лабораторных лизиметрических экспериментов // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. 2021. № 3. С. 70–78.
13. Ковалева Е.И., Трофимов С.Я., Шоба С.А. Реакция высших растений на уровень нефтезагрязнения в вегетационном опыте // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. 2022. № 3. С. 74–84.
14. Ковалева Е.И., Трофимов С.Я., Шоба С.А. О выборе индикационных показателей для экологического нормирования нефтепродуктов в каштановых почвах // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. 2023. Т. 78. № 2. С. 94–105.
15. Ковалева Е.И., Трофимов С.Я., Шоба С.А. Функционирование почв в условиях нефтяного загрязнения в таежной зоне Западной Сибири // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. 2024. Т. 79. № 4. С. 214–227.
16. Ковда В.А. Роль и функции почвенного покрова в биосфере земли. Доклад на VII делегатском съезде Всесоюзного общества почвоведов. Пущино, 1985. 11 с.
17. Методические рекомендации по гигиеническому обоснованию ПДК химических веществ в почве от 5 августа 1982 г. № 2609-82.
18. Основы государственной политики в области экологического развития России на период до 2030 года (утв. Президентом РФ от 30

апреля 2012 г.).

19. *Петров А.А.* Углеводороды нефти. М.: Химия, 1984. 264 с.

20. Постановление Правительства РФ от 29.05.2025 № 781 “Об утверждении Правил проведения рекультивации и консервации земель”. URL:

[https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_506469/90e01d185047971fe921b2bb4ea2abe4389a57d5//](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_506469/90e01d185047971fe921b2bb4ea2abe4389a57d5//).

21. Постановление Правительства РФ от 13.02.2019 № 149 “О разработке, установлении и пересмотре нормативов качества окружающей среды для химических и физических показателей состояния окружающей среды, а также об утверждении нормативных документов в области охраны окружающей среды, устанавливающих технологические показатели наилучших доступных технологий” (вместе с “Положением о разработке, установлении и пересмотре нормативов качества окружающей среды для химических и физических показателей состояния окружающей среды”). URL:

[https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_318449/accc4ba32558fde74927e6daa1d005d41462f677/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_318449/accc4ba32558fde74927e6daa1d005d41462f677/).

22. Постановление Правительства РФ от 15 апреля 2002 г. № 240 “О порядке организации мероприятий по предупреждению и ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов на территории Российской Федерации”.

URL: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_36284/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_36284/).

23. Приказ МПР РФ от 12 сентября 2002 г. № 574 “Об утверждении Временных рекомендаций по разработке и введению в действие нормативов допустимого остаточного содержания нефти и продуктов ее трансформации в почвах после проведения рекультивационных и иных восстановительных работ”. URL:

<https://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=EXP&n=309151#YTPLQaU9rEEEnKZY1>.

24. СанПиН 1.2.3685-21 “Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания”. URL:

[https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_375839/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_375839/).

25. Соколов М.С., Семенов А.М., Спиридонов Ю.Я. Здоровая почва – условие устойчивости и развития агро- и социосфер (проблемно-аналитический обзор) // Известия РАН. Сер. биологическая, 2020. № 1. С. 12–21.

26. Терехова В.А. Биотестирование экотоксичности почв при химическом загрязнении: современные подходы к интеграции для оценки экологического состояния (обзор) // Почвоведение. 2022. № 5. С. 586–

599.

27. Трофимов С.Я. Современное состояние и перспективы развития системы нормативов допустимого остаточного содержания нефти в почвах после проведения рекультивационных работ // Экологическое нормирование и управление качеством почв и земель. М., 2013. С. 93–97.  
28. Федеральный закон “Об охране окружающей среды” от 10.01.2002 № 7-ФЗ. URL: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_34823/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34823/).  
29. Kovaleva E.I., Trofimov S.Ya., Zhongqi Ch. Impact of oil contamination on ecological functions of peat soils from West Siberia of Russia // Journal of Environmental Quality. 2021. Vol. 50. No. 1. P. 49–62.

## REFERENCES

1. Vorobeychik E.L., Sadykov O.F., Farafontov M.G., *Ekologicheskoe normirovaniye tekhnogennyh zagryaznenij nazemnyh ekosistem (lokal'nyj uroven')* (Ecological rationing of anthropogenic pollution of terrestrial ecosystems (local level), Ekaterinburg: UIF Nauka, 1994, 280 p.
2. Glazovskaya M.A., *Metodicheskie osnovy ocenki ekologo-geohimicheskoy ustojchivosti pochv k tekhnogennym vozdejstviyam* (Methodological foundations for assessing the ecological and geochemical stability of soils to anthropogenic influences), Moscow, 1997, 102 p.
3. Gorlenko M.V., *Mul'tisubstratnoe testirovanie pochvennyh mikrobnyh soobshchestv: Avtoref. dis. ... kand. biol. n.* (Multisubstrate testing of soil microbial communities, Extended abstract of Cand. Biol. Sci. thesis), Moscow, 1995, 23 p.
4. State Report on the State and Environment of the Russian Federation in 2022. URL: [https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye\\_doklady/gosudarstvennyy\\_doklad\\_o\\_sostoyanii\\_i\\_ob\\_okhrane\\_okruzhayushchey\\_sredy\\_rossiyskoy\\_federatsii\\_v\\_2022/](https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye_doklady/gosudarstvennyy_doklad_o_sostoyanii_i_ob_okhrane_okruzhayushchey_sredy_rossiyskoy_federatsii_v_2022/).
5. Dobrovolsky G.V., Nikitin E.D., *Funkcii pochv v biosfere i ekosistemakh* (Functions of soils in the biosphere and ecosystems), Moscow: Nauka, 1990, 258 p.
6. The Land Code of the Russian Federation dated 10/25/2001 N 136-FROM. URL: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_33773/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_33773/).
7. Kovaleva E.I., Pukalchik M.A., Yakovlev A.S., On the possibility of using catalase activity in environmental regulation and assessment of oil-contaminated soils, *Ecology and industry of Russia*, 2016, Vol. 20, No. 11, pp. 26–31.
8. Kovaleva E.I., Yakovlev A.S., Nikolaenko M.G., Makarov A.O., Makarov A.A., Ecological assessment of oil-contaminated soils using *enchitreides*,

*Pochvovedenie*, 2017, No. 3, pp. 1–10.

9. Kovaleva E.I., Yakovlev A.S., Ecological functions of marsh ecosystems (on the example of Sakhalin Island), *Ecology and industry of Russia*, 2017, Vol. 21, No. 12, pp. 32–37.
10. Kovaleva E.I., Yakovlev A.S., A model of ecological rationing of oil-contaminated soils based on changes in some biogeocenotic functions, *Ecology and industry of Russia*, 2018, Vol. 22, No. 11, pp. 34–39.
11. Kovaleva E.I., Yakovlev A.S., Pashkevich E.B., Rationing of petroleum products in soils under conditions of vegetation experience (on the example of zonal and intrazonal soils of the island), *Problems of agrochemistry and ecology*, 2019, No. 3, pp. 60–67.
12. Kovaleva E.I., Demin V.V., Trofimov S.Ya., Radial migration of petroleum products in the soils of o. Sakhalin based on laboratory lysimetric experiments, *Bulletin of the Moscow University, Series 17: Soil Science*, 2021, No. 3, pp. 70–78.
13. Kovaleva E.I., Trofimov S.Ya., Shoba S.A., The reaction of higher plants to the level of oil pollution in the vegetation experience, *Bulletin of the Moscow University, Series 17: Soil Science*, 2022, No. 3, pp. 74–84.
14. Kovaleva E.I., Trofimov S.Ya., Shoba S.A., On the choice of indicative indicators for environmental rationing of petroleum products in chestnut soils, *Bulletin of the Moscow University, Series 17: Soil Science*, 2023, Vol. 78, No. 2, pp. 94–105.
15. Kovaleva E.I., Trofimov S.Ya., Shoba S.A., Functioning of soils in conditions of oil pollution in the taiga zone of Western Siberia, *Bulletin of the Moscow University, Series 17: Soil Science*, 2024, Vol. 79, No. 4, pp. 214–227.
16. Kovda V.A., *Rol' i funkciu pochvennogo pokrova v biosfere zemli* (The role and functions of soil cover in the earth's biosphere), Report at the VII delegate meeting of the All-Union Leadership Community, Pushchino, 1985, 11 p.
17. Methodological recommendations on the hygienic justification of the maximum permissible concentration of chemicals in soil dated August 5, 1982, No. 2609-82.
18. Fundamentals of state policy in the field of environmental development of Russia for the period up to 2030 (approved by the President of the Russian Federation on April 30, 2012).
19. Petrov A.A., *Uglevodorydy nefti* (Oil hydrocarbons), Moscow: Khimiya, 1984, 264 p.
20. Government Decree No. 781 dated May 29, 2025 “On Approval of the Rules for Land Reclamation and Conservation”. URL: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_506469/90e01d185047971fe921b2bb4ea2abe4389a57d5/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_506469/90e01d185047971fe921b2bb4ea2abe4389a57d5/).

21. Decree of the Government of the Russian Federation dated 02/13/2019 No. 149 “On the Development, Establishment and Revision of environmental quality standards for chemical and physical indicators of the environment, as well as on the Approval of regulatory documents in the field of environmental protection that establish technological indicators of the best available technologies” (together with the “Regulation on the Development, Establishment and Revision of Environmental Quality Standards media for chemical and physical indicators of the state of the environment”). URL: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_318449/accc4ba32558fde74927e6daa1d005d41462f677/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_318449/accc4ba32558fde74927e6daa1d005d41462f677/).
22. Decree of the Government of the Russian Federation dated April 15, 2002 No. 240 N “On the procedure for organizing measures to prevent and eliminate oil and Petroleum Product spills on the territory of the Russian Federation”.  
URL: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_36284/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_36284/).
23. Order of the Ministry of Agriculture of the Russian Federation No. 574 dated September 12, 2002 “On Approval of Interim Recommendations for the development and implementation of standards for the permissible residual content of oil and its Transformation products in Soils after reclamation and other Restoration work”. URL:  
<https://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=EXP&n=309151#YTPLQaU9rEEnKZY1>.
24. SanPiN 1.2.3685-21 “Hygienic standards and methods for assessing safety and (or) safety for people with disabilities”. URL: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_375839/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_375839/).
25. Sokolov M.S., Semenov A.M., Spiridonov Yu.Ya., Healthy soil is a condition for the sustainability and development of argots Sociosphere (a problem-analytical review), *Izvestiya RAS, Biologicheskaya Ser.*, 2020, No. 1, pp. 12–21.
26. Terekhova V.A., Biotesting of soil ecotoxicity under chemical pollution: modern approaches to integration for assessing the ecological state (review), *Pochvovedenie*, 2022, No. 5, pp. 586–599.
27. Trofimov S.Ya., Current state and prospects of development of the system of standards for the permissible residual oil content in soils after reclamation work, *Ecological rationing and soil and land quality management*, Moscow, 2013, pp. 93–97.
28. Federal Law “On Environmental Protection” dated 10.01.2002 No. 7-FZ.  
URL: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_34823/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34823/).
29. Kovaleva E.I., Trofimov S.Ya., Zhongqi Ch., The influence of oil pollution on the ecological functions of peat soils in Western Siberia, Russia, *Journal of Environmental Quality*, 2021, Vol. 50, No. 1, pp. 49–62.

Научное издание

Бюллетень Почвенного института  
имени В.В. Докучаева

Выпуск 126

Главный редактор *А.Л. Иванов*

Заместитель главного редактора *И.Ю. Савин*

Редактор, компьютерная верстка *А.Ю. Романовская*

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение  
Почвенный институт имени В.В. Докучаева  
119017, Москва, Пыжевский пер., 7, стр. 2  
<https://bulletin.esoil.ru>  
e-mail: [bulletin@esoil.ru](mailto:bulletin@esoil.ru)

Сдано в набор 25.12.2025 г.  
Подписано в печать 25.12.2025 г.  
Формат 60×84/16. Бумага офсетная.  
Усл. печ. л. 17 Тираж 50 экз. Заказ №

Цена договорная.

Отпечатано с готового макета по заказу  
Почвенного института имени В.В. Докучаева  
ИП Ерховой И.М. (ОГРНИП 319774600080241)  
Тел. (495) 799-48-85  
e-mail: [apr-grpa@list.ru](mailto:apr-grpa@list.ru)