

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

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

---

---

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

**Выпуск 127**

**Москва**  
**2026**

<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 127**

**Moscow  
2026**

<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)  
**Чендев Ю. Г.** (Белгородский государственный университет, Белгород)  
**Швиденко А. З.** (Международный институт прикладного системного анализа, Австрия)  
**Шишков Т. А.** (Институт почвоведения им. Н. Пушкирова, 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** (Stellenbosh 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)

© ФГБНУ ФИЦ “Почвенный институт им. В.В. Докучаева”, 2026 г.

© Federal Research Centre “V.V. Dokuchaev Soil Science Institute”, 2026

## СОДЕРЖАНИЕ

Почвенные комбинации как объект цифровой почвенной картографии: лесостепь Окско-Донской низменности <i>Козлов Д.Н., Лозбенев Н.И., Левченко Е.А.</i> .....	5
Водный режим почвенного покрова агроландшафта для агроэкологической группировки земель <i>Болотов А.Г., Калнина А.И., Шеин Е.В., Дембовецкий А.В., Калиниченко Р.В., Филь П.П.</i> .....	39
Почвы и антропогенное изменение климата <i>Lal R.</i> .....	62
Анализ свойств засоленных почв Усть-Ордынского Бурятского округа Иркутской области <i>Черноусенко Г.И.</i> .....	72
Почвы парка “Дендрарий” города Сочи: признаки деградации <i>Герасимова М.И., Орлова К.С., Виндекер Г.В., Вернюк Ю.И., Соболев Н.С.</i> .....	92
Бактериальные сообщества “подвешенных почв” заповедников Вьетнама <i>Князева А.В., Лысак Л.В., Чепцов В.С., Александрова А.В.</i> .....	126
Экологическое состояние почв и вод в горнодобывающих районах Южногобийского аймака Монголии <i>Белозерцева И.А., Энх-Амгалан С., Гагаринова О.В., Емельянова Н.В., Гэрэлмаа Г., Амарсанаа О., Саранцэцэг Б., Урантамир Г., Аяулы Е., Ганзориг О., Гэрэлт-Од Д.</i> .....	160
Новый методический подход к автоматизированному мониторингу дыхания почвы в полевых условиях <i>Смагин А.В., Садовникова Н.Б., Сухоруков С.В., Беляева Е.А., Корчагина К.В., Касимов А.Р.</i> .....	189
Распределение изотопного состава углерода между компонентами органического вещества в целинном и пахотном типичном черноземе <i>Артемова З.С., Зазовская Э.П., Засухина Е.С., Ярославцева Н.В., Цомаева Е.В., Когут Б.М.</i> .....	212
Некоторые особенности содержания тяжелых металлов в аллювиальных почвах р. Десны <i>Чекин Г.В., Нечаев М.М.</i> .....	243

## CONTENTS

Soil combinations as an object of digital soil mapping: forest-steppe of the Oka-Don lowland <i>Kozlov D.N., Lozbenev N.I., Levchenko E.A.</i> .....	5
The water regime of the soil cover of the agricultural landscape and its components (using the example of the VNIIMZ experimental field in the Tver region) <i>Bolotov A.G., Kalnina A.I., Shein E.V., Dembovetskiy A.V., Kalinichenko R.V., Phil P.P.</i> .....	39
Soil and anthropogenic climate change <i>Lal R.</i> .....	62
Analysis of the properties of saline soils of the Ust-Orda Buryat district of the Irkutsk region <i>Chernousenko G.I.</i> .....	72
Soils of the “Arboretum” Park in Sochi: signs of degradation <i>Gerasimova M.I., Orlova K.S., Vindeker G.V., VERNYUK Yu.I., Sobolev N.S.</i> .....	92
Bacterial communities of “suspended soils” of Vietnam national reserves <i>Kniazeva A.V., Lysak L.V., Cheptsov V.S., Aleksandrova A.V.</i> .....	126
Ecological state of soils and waters in the mining areas of South Gobi province of Mongolia <i>Belozertseva I.A., Enkh-Amgalan S. Gagarinova O.V., Emelyanova N.V., Gerelmaa G., Sarantsetseg B., Urantamir G., Ayuuly E., Ganzorig O., Gerelt-Od D.</i> .....	160
A new methodical approach to automated monitoring of soil respiration in the field <i>Smagin A.V., Sadovnikova N.B., Sukhorukov S.V., Belyaeva E.A., Korchagina K.V., Kacimov A.R.</i> .....	189
Distribution of the isotopic composition of carbon between components of organic matter in virgin and cultivated typical chernozems (Haplic Chernozem) <i>Artem'eva Z.S., Zazovskaya E.P., Zasukhina E.S., Yaroslavtseva N.V., Tsomaeva E.V., Kogut B.M.</i> .....	212
Some features of trace element content in alluvial soils of the Desna River <i>Chekin G.V., Nechaev M.M.</i> .....	243

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2026-127-5-38



### Ссылки для цитирования:

Козлов Д.Н., Лозбенев Н.И., Левченко Е.А. Почвенные комбинации как объект цифровой почвенной картографии: лесостепь Окско-Донской низменности // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2026. Вып. 127. С. 5-38. DOI: 10.19047/0136-1694-2026-127-5-38

### Cite this article as:

Kozlov D.N., Lozbenev N.I., Levchenko E.A., Soil combinations as an object of digital soil mapping: forest-steppe of the Oka-Don lowland, Dokuchaev Soil Bulletin, 2026, V. 127, pp. 5-38, DOI: 10.19047/0136-1694-2026-127-5-38

### Благодарность:

Работа выполнена в рамках Государственного Задания Минобрнауки России на тему “Оптимизация сельскохозяйственного землепользования по экологическим и экономическим условиям в контексте современных вызовов” (НИОКТР № 125042105332-2).

### Acknowledgments:

The studies were carried out within the framework of State assignment of the Ministry of Education and Science of Russia on the topic “Optimization of agricultural land use under environmental and economic conditions in the context of modern challenges” (NIOKTR No. 125042105332-2).

## Почвенные комбинации как объект цифровой почвенной картографии: лесостепь Окско-Донской низменности

© 2026 г. Д. Н. Козлов\*, Н. И. Лозбенев\*\*, Е. А. Левченко\*\*\*

ФИЦ “Почвенный институт им. В.В. Докучаева”, Россия,  
119017, Москва, Пыжжевский пер, 7, стр. 2,

\* <https://orcid.org/0000-0003-0103-0300>, e-mail: [Kozlov\\_DN@esoil.ru](mailto:Kozlov_DN@esoil.ru),

\*\* <https://orcid.org/0000-0003-0377-3124>, e-mail: [nlozbenev@mail.ru](mailto:nlozbenev@mail.ru),

\*\*\* <https://orcid.org/0009-0000-7865-9807>, e-mail: [novichkova.ea@mail.ru](mailto:novichkova.ea@mail.ru).

Поступила в редакцию 06.01.2026, после доработки 08.01.2026,  
принята к публикации 27.01.2026

**Резюме:** На примере участка Битюго-Савала-Цнинского междуречья Окско-Донской низменности площадью 0.5 млн га показаны

возможности цифрового картографирования компонентного состава микроструктур почвенного покрова лесостепной зоны. Слабопересеченный рельеф междуречья и породы с низкой фильтрационной способностью определили условия затрудненного поверхностного и внутрипочвенного стока и, как следствие, преобладание в структуре почвенного покрова полугидроморфных и гидроморфных почв черноземного ряда с участием солонцовых почв на северной границе их ареала. Особенности почвенного покрова региона выражены зависимостью долевого участия почв в составе почвенных комбинаций от морфологических особенностей мезорельефа как ведущего фактора их организации. Разнообразие почв и их внутриландшафтная изменчивость определены массивом 2 200 почвенных описаний 12 типов/подтипов почв. Наиболее значимые факторы их пространственной организации – крутизна склонов ( $^{\circ}$ ), относительные превышения в окрестности 2 000 м (м), превышения над базисом эрозии (м), соотношение длины и крутизны склонов (LS-фактор), отношение водосборной площади к локальной крутизне (TWI), глубина (м) и плотность (га/100 га) замкнутых понижений. Региональное разнообразие почвенного покрова сведено к десяти типам микроструктур с учетом их компонентного состава. Сравнение их границ с содержанием архивных материалов почвенного обследования показало сопоставимость и преимущества цифровой модели организации почвенного покрова по сравнению с региональным обобщением крупномасштабных почвенных карт землепользований (юг Тамбовской области). Используемый подход представляется перспективным для решения фундаментальных и прикладных задач, связанных с изучением и инвентаризацией почвенного покрова как компонента ресурсного потенциала сельскохозяйственного землепользования.

**Ключевые слова:** структура почвенного покрова; почвенно-ландшафтные связи; черноземы; лугово-черноземные почвы; солонцы; фонд данных; землеустройство.

## **Soil combinations as an object of digital soil mapping: forest-steppe of the Oka-Don lowland**

© 2026 D. N. Kozlov\*, N. I. Lozbenev\*\*, E. A. Levchenko\*\*\*

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

\*<https://orcid.org/0000-0003-0103-0300>, e-mail: [Kozlov\\_DN@esoil.ru](mailto:Kozlov_DN@esoil.ru),

\*\* <https://orcid.org/0000-0003-0377-3124>, e-mail: [nlozbenev@mail.ru](mailto:nlozbenev@mail.ru),  
\*\*\* <https://orcid.org/0009-0000-7865-9807>, e-mail: [novichkova.ea@mail.ru](mailto:novichkova.ea@mail.ru).

Received 06.01.2026, Revised 08.01.2026, Accepted 27.01.2026

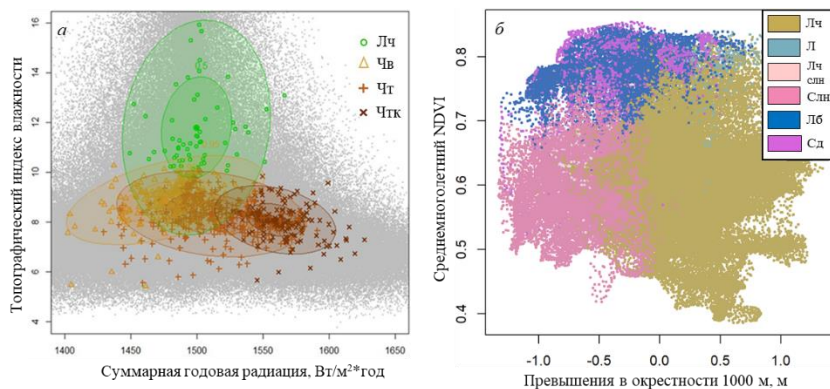
**Abstract:** A 0.5 million-hectare study area of the Bityug-Saval-Tsna interfluve of the Oka-Don lowland demonstrates the potential of digital mapping of soil combinations in the forest-steppe zone. The gently rugged topography of the interfluve and deposits with low permeability have resulted in restricted surface and subsurface runoff, leading to a predominance of semi-hydromorphic and hydromorphic chernozem soils in the soil structure, with some solonetzic soils at the northern boundary of their range. The region's soil cover characteristics are expressed by the dependence of the proportion of soils in soil combinations on the morphological features of the mesorelief, which is the leading factor in their organization. Soil diversity and intra-landscape variability are determined by a set of 2,200 soil descriptions of 12 soil types/subtypes. The most significant factors of their spatial organization are slope steepness ( $^{\circ}$ ), topographic position index with radius 2,000 m (m), channel network base level (m), LS-factor, topographic wetness index (TWI), depth (m), and density (ha/100 ha) of closed depressions. Regional soil cover diversity is reduced to ten types of soil combinations, taking into account their component composition. A comparison of their boundaries with the contents of archival soil survey data demonstrated the comparability and advantages of the digital soil cover organization model compared to a regional generalization of large-scale soil maps of land use (southern Tambov Oblast). The approach used appears promising for solving fundamental and applied problems related to the study and inventory of soil cover as a component of the resource potential of agricultural land use.

**Keywords:** soil cover structure; soil-landscape relationships; chernozems; meadow-chernozem soils; solonetz soils; data fund; land management.

## ВВЕДЕНИЕ

Развитие цифровых технологий пространственного анализа открыло новые возможности содержательного анализа почвенно-ландшафтных связей как основы картографирования почвенного покрова (McBratney et al., 2003; Minasni, McBratney, 2016; Савин, 2025). Суть анализа заключается в поиске наилучшей зависимости пространственной изменчивости почвенных классов, либо отдельных почвенных свойств от факторов почвообразования, охарактеризованных по элементам регулярной сетки. В многочисленных исследованиях показано, что соответствие почв и факторов почво-

образования никогда не бывает однозначным (Bishop et al., 2006; Malone et al., 2011). Обычно к источникам неопределенности почвенно-ландшафтных связей относят неполный учет факторов почвообразования и масштаба их проявления, ограничения использованных методов моделирования, неточности источников пространственной информации и их совмещения в процессе анализа (Vermeulen, Niekerk, 2017). Их совокупное влияние выражается в наблюдении в локальной области признакового пространства (рис. 1) разных почвенных классов или значений почвенных свойств (Kozlov et al., 2017; Smirnova et al., 2025). Снижение неопределенности связывается с расширением состава картографической модели, повышении детальности ковариат, сгущении сети почвенного опробования, использованием прогрессивных методов моделирования (Scarpone et al., 2016).



**Рис. 1.** Примеры положения почв лесостепи в пространстве наиболее значимых топографических факторов их дифференциации: (а) Среднерусская возвышенность (Kozlov et al., 2017); серые точки – область всех значений атрибутов; (б) Окско-Донская низменность (Smirnova et al., 2025).

**Fig. 1.** The position of soils in the feature space of the most significant topographic indexes: (a) soils in the space of the topographic wetness index and total annual radiation (Kozlov et al., 2017); gray dots are the area of all attribute values; (b) soils in the space of the topographic position index with radius 1,000 m and average long-term values of the NDVI indicator (Smirnova et al., 2025).

Однако помимо методических и технических источников неопределенности “нагетт-эффект” почвенно-ландшафтных связей сопряжен с естественной комплексностью почвенного покрова, из-за чего каждый пиксель на местности соответствует комбинации двух и более почв (Сорокина, Козлов, 2009; Козлов, Сорокина, 2012; Козлов и др., 2019). Снижение неопределенности почвенной карты в таком случае невозможно без повышения детальности ковариат, определяющих или отражающих почвенное варьирование. При значительном охвате территории повышение детальности ковариат часто экономически не оправданно. Кроме того, изменчивость почв может не иметь адекватной ландшафтной индикации в условиях конкретного региона, например, при рассогласовании почвенно-ландшафтных связей в результате агрогенной трансформации микрорельефа (Минаев и др., 2019).

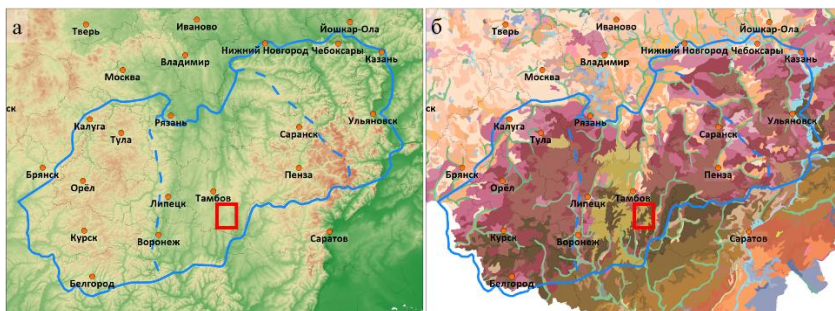
Развитие русской почвенно-картографической школы второй половины XX в. связано с концепцией структуры почвенного покрова (Фридланд, 1976). Согласно этому учению, почвенный покров имеет иерархическую организацию и в зависимости от масштаба исследования объектом картографирования служат разные единицы. В крупном масштабе это комбинации 2–4 почв и крупные элементарные почвенные ареалы (ЭПА), соизмеримые с элементами мезорельефа. Предметом исследований почвенных комбинаций (ПК) являются их компонентный состав, геометрическая форма и характер границ. Отражение в каждой картографической единице не только доминантных, но и сопутствующих компонентов, повышает информативность карт при инвентаризации, мониторинге и рациональном использовании земельных ресурсов.

Цель статьи – развить методы цифрового картографирования состава почвенных комбинаций (Сорокина, Козлов, 2009; Kozlov et al., 2018) на примере почвенного покрова междуречных равнин, приводораздельных и прибалочных склонов северной лесостепи Окско-Донской низменности Русской равнины.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследованиями охвачен участок Битюго-Савала-Цнинского междуречья Окско-Донской низменности площадью 0.5 млн га,

строение которого способствует широкому распространению переувлажненных земель (рис. 2, 3). Вторичная эрозионная равнина с перепадом высот 100 м имеет слабую горизонтальную расчлененность – менее 0.5 км/км<sup>2</sup>. Крутизна фоновых междуречий до 1°, придолинных склонов до 5°. Центральные, слабо дренированные части междуречий усеяны многочисленными округлыми понижениями термокарстового и суффозионного происхождения, достигающими в диаметре 500 м и глубины до 3 м (Мильков, 1976; Самойлова, 1981; Величко, 1996). Кроме того, встречаются плоские, неглубокие (0.5–1 м) чашеобразные понижения с линзами засоленных грунтовых вод.

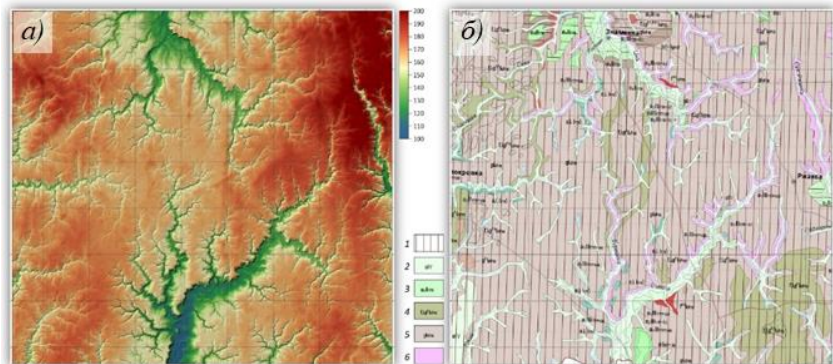


**Рис. 2.** Участок Битюго-Савало-Цнинского междуречья (красный контур) на фоне: *а* – рельефа Среднерусской лесостепной провинции природно-сельскохозяйственного районирования (1983, синий контур); *б* – типа/подтипа почв ЕГРПР (2013).

**Fig. 2.** The study area of the Bityug-Savalo-Tsna interfluve (red outline) on the background of: *а* – the topography of the Central Russian forest-steppe province of natural and agricultural zoning (1983, blue outline); *б* – the soil type/subtype of the Unified State Register of Natural Resources (EGRPR) (2013).

Моренные равнины, песчаные долинныя зандры, третья и четвертые надпойменные террасы долин Цны, Битюга и Савалы перекрыты толщей субаэральных суглинков и глин, мощностью от 10 м в центральных частях междуречий до первых метров и

меньше в долинах. Пойменные отложения преимущественно тяжелого гранулометрического состава (рис. 3).



**Рис. 3.** Литолого-геоморфологические особенности Битюго-Савала-Цнинского междуречья Окско-Донской низменности: (а) рельеф, (абсолютная высота, м); (б) фрагмент геологической карты четвертичных отложений (1998, М 1 : 500 000): 1 – нерасчлененный комплекс субаэральных образований, делювиальных отложений; 2 и 3 – аллювиальные отложения пойм и террас; 4 – водно-ледниковые пески времени отступления ледника до 7 м, 5 – ледниковые валунные суглинки до 50 м; 6 – дочетвертичные отложения.

**Fig. 3.** Lithological and geomorphological features of the Bityug-Saval-Tsna interfluvium of the Oka-Don Lowland: (а) topography, (б) fragment of the geological map of Quaternary deposits (1998, Scale 1 : 500 000): 1 – undifferentiated complex of subaerial formations, deluvial deposits; 2 and 3 – alluvial deposits of floodplains and terraces; 4 – fluvioglacial sands of the glacier retreat time up to 7 m, 5 – glacial boulder loams up to 50 m; 6 – pre-Quaternary deposits.

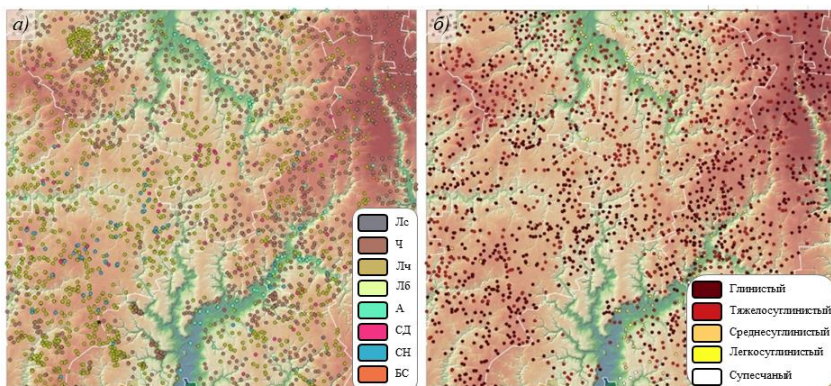
Участок частично или полностью охватывает 7 районов Тамбовской области: Сампурский, Знаменский, Ржаксинский, Рассказовский, Жердевский, Токаревский, Мордовский и Уваровский. Общая его площадь 630 тыс. га, из них пашни – 491 тыс. га или 73% площади, а всего земель сельскохозяйственного назначения 564 тыс. га (84% площади). Участки лесной и луговой растительности сохранились лишь вокруг понижений и внутри них, а также

на участках с засоленными почвами. Днища крупных западин заняты осоково-кочкарными болотами, а их склоны – осинниками. В мелких западинах преобладают осоково-разнотравные луга. В засоленных западинах наблюдается разреженная растительность с преобладанием злаково-разнотравно-полынных сообществ.

Характеристика почв получена из архивных материалов крупномасштабного почвенного обследования государственного фонда данных землеустройства (ГФДЗ, рис. 4). С почвенных карт хозяйств определено положение 2 тыс. опорных разрезов с факторно-генетической диагностикой почв до уровня вида по классификации почв СССР (1977, рис. 4). Для 1 тыс. из них из почвенных очерков получены аналитические характеристики органо-аккумулятивного горизонта: мощность горизонта (см), содержание гумуса (%), доля физической глины (%). Почвы с небольшим объемом выборки были объединены с близкими по генезису таксонами (табл. 1). Так, темно-серые лесные почвы были отнесены к черноземам выщелоченным, лугово-болотные к влажно-луговым, а солонцы лугово-черноземные объединены с солонцами черноземно-луговыми. Кроме того, использовано более 200 собственных полевых описаний почв с агрохимической характеристикой, полученных в 2018-2024 годах.

По встречаемости на уровне типа почвы опорных разрезов образуют ряд (рис. 4а): серые лесные (22) – черноземы (1115) – лугово-черноземные (673) – луговые (173) – аллювиальные (102) – солонцы (74) – солоды (65). На уровне подтипа черноземы типичные (793) и лугово-черноземные (673) почвы встречаются чаще черноземов выщелоченных (464). Почвы глинистого состава (1211) преобладают над тяжелосуглинистыми (946) и среднесуглинистыми (88, рис. 4б).

По проявлению негативных процессов встречаются почвы: эродированные – слабосмытые (84) и среднесмытые (24); оглеенные – глубокооглеенные (58), глееватые (152) и глеевые (40); солонцы – корковые (24), мелкие (22), средние (20) и глубокие (9); засоленные – солончаковые (29), солончаковатые (15) и солонцеватые (82).



**Рис. 4.** Типы почв (*a*; индексами обозначены: Лс – серые лесные, Ч – черноземы, Лч – лугово-черноземные, Лб – луговые (лугово-болотные), А – аллювиальные, СД – солоды, СН – солонцы, БС – почвы балочных склонов) и группы их гранулометрического состава по Качинскому (*б*) по массиву опорных разрезов архивных материалов крупномасштабного почвенного обследования 1970–1995 гг.

**Fig. 4.** Soils types (*a*; indexes are indicated: Лс – gray forest, Ч – chernozems, Лч – meadow-chernozem, Лб – meadow-fog, А - alluvial, СД – malt, СН – solonetz, БС – soils of girder slopes) and groups of granulometric composition of organo-accumulative horizon according to Katchynski (*б*), according to the array of reference sections of archival materials from a large-scale soil survey of 1970–1995.

Диагностическими показателями почв в региональной модели почвенно-ландшафтных связей (ПЛС) выступали таксоны почв на уровне подтипа (табл. 1). Были исключены редко встречающиеся серые лесные почвы, положение которых в ландшафтах региона не ясно. Отдельно моделировалась степень проявления водной эрозии по выборке почв: Э0 – не смытые, Э1 – слабо-, Э2 – среднесмытые.

В условиях однородных почвообразующих пород ведущим фактором дифференциации почвенного покрова междуречий выступает рельеф.

**Таблица 1.** Почвы обучающей выборки

**Table 1.** Soils of the training sample of the soil-landscape relationships model

Тип/ Подтип почв <sup>1</sup>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	332	333	342	371	372	731	732	761	763	832	931	932
	Чв	Чт	Лч	Л	ВЛ	СДлс	СДл	СНлч	СНлб	Ал	БС	АД
Число точек и их доля в выборке	491	739	935	153	38	24	45	63	12	82	31	20
	0.19	0.28	0.36	0.06	0.01	0.01	0.02	0.02	0.00	0.03	0.01	0.01
Доля в модели <sup>2</sup>	0.19	0.29	0.22	0.12	0.03	0.03	0.02	0.01	0.01	0.06	0.01	0.01
Почвы на картах <sup>3</sup>			Лч	ЧЛ			ПГЭ					

**Примечание.** <sup>1</sup> Чв – чернозем выщелоченный, Чт – чернозем типичный, Лч – лугово-черноземная, Л – луговая, ВЛ – влажно-луговая, СДлс – солодь лугово-степная, СДл – солодь луговая, СНлч – солонец лугово-черноземный, СНлб – солонец лугово-болотный, Ал – аллювиальная, БС – почвы балочных склонов, АД – аллювиально-делювиальные почвы днищ оврагов и балок;

<sup>2</sup> априорная вероятность встречи почвы на модельном участке;

<sup>3</sup> почвы легенды архивных карт интерпретированы как: луговато-черноземные (Лч) как Лч (код 342), черноземно-луговые (ЧЛ) как Л (код 371); серые лесные поверхностно-глеево-элювиальные (ПГЭ) как почвы западного комплекса.

**Note.** <sup>1</sup> Чв – leached chernozem, Чт – typical chernozem, Лч – meadow-chernozem, Л – meadow, ВЛ – wet-meadow, СДлс – meadow-steppe solod, СДл – meadow solod, СНлч – meadow-chernozem solonetz, СНлб – meadow-marsh solonetz, Ал – alluvial, БС – gully slope soils, АД – alluvial-deluvial soils of ravine and gully bottoms;

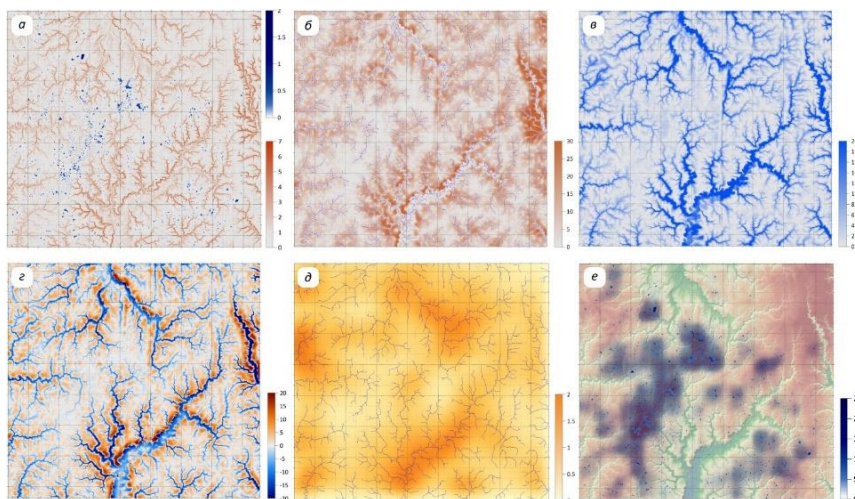
<sup>2</sup> a priori probability of soil occurrence on the model plot;

<sup>3</sup> the soils of the legacy maps are interpreted as: meadow-chernozems as Лч (code 342), chernozem-meadow as Л (code 371); gray forest surface-gley-eluvial as soils of the depression complex.

Его характеристика дана по ЦМР с шагом 20 м (рис. 3а), построенной по высотным отметкам топографической карты с основным сечением горизонталей 2.5 м (Koshel, 2012). В программе SAGA (Conrad et al., 2015) произведен расчет более 20 морфометриче-

ских величин (рис. 5), определяющих условия почвообразования: 1) локальное перераспределение стока между вогнутыми и выпуклыми элементами рельефа: индекс относительных превышений в локальной окрестности XX м ( $tpi_{XX}$ , м), глубина ( $cd_m$ , м; рис. 5а) и плотность ( $cd_{dn}$ , га/100 га; рис. 5е) замкнутых понижений; 2) региональное перераспределение стока по элементам овражно-балочной и речной сети: индекс относительных превышений в региональной окрестности XXX м ( $tpi_{XXX}$ , м; рис. 5г), площадь водосбора ( $tca$ ), топографический индекс влажности ( $twi$ ), густота эрозионного расчленения ( $er_{dn}$ , км/км<sup>2</sup>; рис. 5д); 3) скорость миграционных потоков: крутизна склонов ( $slp$ , °; рис. 5а), эрозионный фактор рельефа ( $lsf$ ); 4) поле инсоляции с учетом крутизны и экспозиции склонов ( $ins$ ); 5) режим почвенно-грунтовых вод, поверхностного и подземного стока: превышение над водотоком ( $cnd_m$ ; рис. 5б); глубина долин ( $cd_{dn}$ , м; рис. 5в). С учетом детальности исходных топографических карт и размера элемента ЦМР 20 × 20 м морфометрические величины характеризуют состояние земной поверхности с размерами 60 × 60 м. Такой охват позволяет воспроизвести лишь особенности мезо- и макро-рельефа, что отвечает задаче отражения топографических условий формирования элементарных почвенных структур (Фридланд, 1976; Hole, Campbell, 1985).

Для моделирования отношений почва =  $f$  (топографические факторы почвообразования) использовался пошаговый дискриминантный анализ (Webster, Burrough, 1974; Bell et al., 1992). Анализ позволяет ранжировать топографические факторы по их вкладу в объяснение пространственной изменчивости таксонов почв и рассчитать условные вероятности встречаемости почв в соответствии с нормальной функцией распределения. Последующий анализ этих вероятностей позволяет получить для каждого пикселя: 1) определенность прогноза (как величину максимальной вероятности из всех возможных); 2) наиболее вероятный таксон почв; 3) типы сочетания наиболее вероятного состояния с двумя или тремя сопутствующими. Карта наиболее вероятного состояния демонстрирует ареалы доминирующего таксона почв (Qi, Zhu, 2011) и карта типов сочетаний доминирующих и сопутствующих почв – ареалы их почвенных комбинаций (Сорокина, Козлов, 2009).



**Рис. 5.** Избранные морфометрические характеристики Битюго-Савало-Цнинского междуречья: *a* – крутизна ( $^{\circ}$ ) и глубина замкнутых понижений (м); *b* – превышение над водотоком (м); *v* – глубина долин (м); *z* – относительные превышения в окрестности 2000 м (м); *d* – густота эрозионного расчленения ( $\text{км}/\text{км}^2$ ); *e* – плотность западин ( $\text{га}/100 \text{ га}$ ).

**Fig. 5.** Several morphometric characteristics of the Bityug-Savalo-Tsna interfluvium: *a* – slope steepness ( $^{\circ}$ ) and depth of closed depressions (m); *b* – elevation above the watercourse (m); *v* – depth of valleys (m); *z* – topographic position index with radius of 2,000 m (m); *d* – density of erosional dissection ( $\text{km}/\text{km}^2$ ); *e* – density of closed depressions ( $\text{ha}/100 \text{ ha}$ ).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В признаковом пространстве модели (табл. 2, 3) наиболее изолированы области почв балочных склонов (91%), аллювиально-делювиальных (63%) и аллювиальных (84%). Почвы междуречий из-за комплексности почвенного покрова не имеют собственной изолированной области. Точность их однозначного прогноза ниже.

Фоновые почвы междуречий – черноземы типичные (55%) и лугово-черноземные (73%). Они встречаются в сочетаниях и комбинациях с черноземами выщелоченными (13%), луговыми (12%),

влажно-луговыми почвами (7%) и солонцами лугово-черноземными (24%) и лугово-болотными (1%). Другую группу почвенных комбинаций образуют почвы западного комплекса – солоды лугово-степные (44%) и луговые (38%); луговые, влажно-луговые с солонцами лугово-черноземными и лугово-болотными.

**Таблица 2.** Точность предсказания таксонов почв в модели почвенно-ландшафтных связей

**Table 2.** Accuracy of prediction of soil taxa in the soil-landscape relationships model

		Почвы обучающей выборки *												
		Почва	Чв	Чт	Лч	Л	ВЛ	СДлс	СДл	СНлч	СНлб	Ал	БС	АД
Предсказанные моделью	Н	491	739	935	153	38	24	45	63	12	82	31	20	
	Чв	<b>66</b>	61	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Чт	221	<b>405</b>	124	3	0	0	3	3	0	0	3	0	
	Лч	192	261	<b>679</b>	92	13	5	8	26	0	3	0	0	
	Л	3	5	34	<b>18</b>	5	0	3	8	5	0	0	0	
	ВЛ	0	0	8	8	<b>3</b>	0	0	0	0	3	0	3	
	СДлс	0	0	11	3	0	<b>11</b>	13	3	0	0	0	0	
	СДл	0	0	3	5	5	8	<b>16</b>	3	0	0	0	0	
	СНлч	0	3	26	16	5	0	0	<b>16</b>	5	0	0	0	
	СНлб	0	0	5	0	0	0	0	0	<b>2</b>	0	0	0	
	Ал	3	3	11	8	5	0	0	5	3	<b>68</b>	0	5	
	БС	5	5	5	0	0	0	0	0	0	0	<b>26</b>	0	
АД	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	0	<b>13</b>		
<b>Точность, %</b>	<b>13</b>	<b>55</b>	<b>73</b>	<b>12</b>	<b>7</b>	<b>44</b>	<b>38</b>	<b>25</b>	<b>10</b>	<b>84</b>	<b>91</b>	<b>63</b>		

**Примечание.** \* Чв – чернозем выщелоченный, Чт – чернозем типичный, Лч – лугово-черноземная почва, Л – луговая, ВЛ – влажно-луговая, СДлс – солода лугово-степная, СДл – солода луговая, СНлч – солонец лугово-черноземный, СНлб – солонец лугово-болотный, Ал – аллювиальная, БС – почвы балочных склонов, АД – аллювиально-делювиальные почвы днищ оврагов и балок.

**Note.** \* Чв – leached chernozem, Чт – typical chernozem, Лч – meadow-chernozem, Л – meadow, ВЛ – wet-meadow, СДлс – meadow-steppe solod, СДл – meadow solod, СНлч – meadow-chernozem solonetz, СНлб – meadow-marsh solonetz, Ал – alluvial, БС – gully slope soils, АД – alluvial-deluvial soils of ravine and gully bottoms.

**Таблица 3.** Оценка расстояния между таксонами почв в признаковом пространстве: под диагональю – значения F-критерия, над диагональю – квадрат дистанции Махаланобиса; все значения достоверны при уровне значимости 0.05

**Table 3.** Estimation of the distance between soil taxa in the feature space: below the diagonal are the F-criterion values, above the diagonal is the squared Mahalanobis distance; all values are significant at a significance level of 0.05

Почвы	Чв	Чт	Лч	Л	ВЛ	СДлс	СДл	СЛч	СНлб	АЛ	БС	АД
Чв		0.2	1.3	5.1	11.8	29.9	23.3	8.4	12.6	45.0	84.3	77.5
Чт	2.6		1.5	5.5	12.5	30.9	23.9	8.5	12.8	46.2	86.4	79.9
Лч	19.3	27.2		2.0	8.5	25.8	19.8	4.4	8.5	42.7	88.5	73.5
Л	26.6	31.3	12.1		4.0	20.6	15.3	0.8	3.2	38.8	93.2	67.1
ВЛ	18.8	20.4	14.0	5.5		15.1	9.5	4.7	6.6	37.4	98.1	58.4
СДлс	30.9	32.3	27.3	19.3	10.0		5.1	21.6	21.8	69.3	114.5	99.2
СДл	43.2	45.8	38.3	23.9	8.9	3.6		16.3	17.7	60.3	111.6	90.4
СНлч	21.0	22.3	11.7	1.6	5.0	16.9	19.3		1.5	40.0	99.5	71.1
СНлб	6.7	6.8	4.5	1.6	2.7	7.9	7.6	0.7		39.1	102.2	76.1
АЛ	142.6	153.8	145.1	93.5	43.8	58.0	79.1	64.3	18.5		156.8	42.0
БС	110.8	115.9	119.7	108.4	75.5	69.8	92.4	93.2	39.9	159.1		150.6
АД	67.2	70.2	64.9	53.5	34.5	48.8	56.4	48.7	25.7	30.5	82.5	

Несмотря на статистически значимые различия средних значений, области почв Чт и Чв, СНлс и СНлб, СДлс и СДл в пространстве факторно-индикационной модели практически совпадают (табл. 4), что позволяет эти пары рассматривать в анализе совместно.

Наиболее значимые в модели переменные (табл. 4): крутизна склонов (F-критерий = 145) и превышения в окрестности 2000 м (F-критерий = 96), совместно отделяющие почвы плакоров (Чт, Чв, Лч) и склонов (БС, АД) от почв не дренируемых междуречий (Л, ВЛ, СДлс, СДл, СНлч, СНлб) и пойм (АЛ); плотность западин (F-критерий = 47), разделяющая фоновые почвы междуречных равнин (Лч, Чв, Чт) и гидроморфные почвы западинного комплекса (Л, ВЛ, СН и СД); превышения над базисом эрозии (F-

критерий = 47), низкими значениями маркирующие почвы пойм (АЛ) и аллювиально-делювиальные почвы (АД). Значимыми переменными также стали: соотношение длины и крутизны склона (LS-фактор, F-критерий = 23), отношение водосборной площади к локальной крутизне (TWI, F-критерий = 20), выстраивающие почвы в ряд возрастающего гидроморфизма, и глубина замкнутых понижений (F-критерий = 20) с высокими значениями для почв западного комплекса (ВЛ, СД).

**Таблица 4.** Таксоны почв в признаковом пространстве наиболее значимых переменных региональной модели почвенно-ландшафтных связей Битюго-Савала-Цнинского междуречья (средние значения)

**Table 4.** Soil taxa in the feature space of the most significant variables of the regional model of soil-landscape relationships of the Bityug-Savala-Tsna interfluvе (average values)

Почва	Крутизна, °	Превышения, м		LS-фактор	Топоиндекс влажности (TWI)	Плотность западин, га/100 га	Глубина западин, м
		в радиусе 2000 м	над базисом эрозии				
Чв	0.8	1.9	9.5	0.43	10.1	0.8	0.00
Чт	0.7	2.2	10.5	0.33	9.8	1.0	0.00
Лч	0.7	1.0	5.8	0.51	10.8	3.4	0.22
Л	0.4	-1.0	2.0	0.38	11.7	6.0	0.03
ВЛ	0.7	-2.2	1.0	1.19	13.3	5.1	0.14
СДлс	0.2	-0.3	1.2	0.00	18.0	8.8	0.32
СДл	0.3	-0.2	1.9	0.02	15.1	7.0	0.36
СНлч	0.3	-1.1	1.3	0.12	11.9	7.5	0.03
СНлб	0.5	-2.3	1.0	0.16	12.1	8.3	0.04
АЛ	0.6	-11.7	0.7	0.74	11.6	0.2	0.00
БС	7.6	-7.5	7.0	5.71	7.3	0.4	0.00
АД	1.7	-14.1	0.7	5.53	14.1	1.1	0.00

Выявленные отношения соответствуют представлениям о географии почв региона и использованы для расчета  $S_{ijk}$  – вектора

степени принадлежности (подобия) почвы каждого элемента территориального пространства  $(i, j)$  к каждой из 12 почвенных категорий  $(k)$  в зависимости от сочетания топографических условий:  $S_{ij}$  ( $S_{ijЧв}$ ,  $S_{ijЧт}$ ,  $S_{ijЛч}$ ,  $S_{ijЛ}$ ,  $S_{ijВл}$ ,  $S_{ijСДлс}$ ,  $S_{ijСДл}$ ,  $S_{ijСНлч}$ ,  $S_{ijСНлб}$ ,  $S_{ijАл}$ ,  $S_{ijБс}$ ,  $S_{ijАд}$ ).

Линейные дискриминантные функции для категорий почв:

$$\delta_{Чв} = -26.2 + 6.1 * slp + 0.2 * tpi1500 + 0.4 * cnd - 2.5 * lsf + 4.1 * twi - 20.6 * cdep + 0.2 * cddn$$

$$\delta_{Чт} = -25.2 + 5.9 * slp + 0.2 * tpi1500 + 0.5 * cnd - 2.5 * lsf + 4.0 * twi - 20.3 * cdep + 0.3 * cddn$$

$$\delta_{Лч} = -25.8 + 5.8 * slp + 0.2 * tpi1500 + 0.3 * cnd - 2.4 * lsf + 4.1 * twi - 21.4 * cdep + 0.4 * cddn$$

$$\delta_{Л} = -30.0 + 5.8 * slp + 0.04 * tpi1500 + 0.3 * cnd - 2.4 * lsf + 4.3 * twi - 19.6 * cdep + 0.6 * cddn$$

$$\delta_{Вл} = -36.2 + 5.8 * slp + 0.02 * tpi1500 + 0.3 * cnd - 1.8 * lsf + 4.6 * twi - 7.1 * cdep + 0.5 * cddn$$

$$\delta_{СДлс} = -63.1 + 7.8 * slp + 0.2 * tpi1500 + 0.3 * cnd - 3.4 * lsf + 6 * twi + 6.6 * cdep + 0.7 * cddn$$

$$\delta_{СДл} = -48.4 + 6.7 * slp + 0.2 * tpi1500 + 0.3 * cnd - 2.9 * lsf + 5 * twi + 18.1 * cdep + 0.5 * cddn$$

$$\delta_{СНлч} = -33.7 + 5.8 * slp + 0.0001 * tpi1500 + 0.3 * cnd - 2.6 * lsf + 4.4 * twi - 21.1 * cdep + 0.7 * cddn$$

$$\delta_{СНлб} = -36.2 + 6.2 * slp - 0.1 * tpi1500 + 0.4 * cnd - 2.9 * lsf + 4.5 * twi - 21.5 * cdep + 0.8 * cddn$$

$$\delta_{Ал} = -35.5 + 2.4 * slp - 1.5 * tpi1500 + 0.8 * cnd - 1.9 * lsf + 4.1 * twi - 20.9 * cdep + 0.2 * cddn$$

$$\delta_{Бс} = -77.3 + 18.3 * slp + 0.9 * tpi1500 - 0.1 * cnd - 3.9 * lsf + 4.9 * twi - 26 * cdep + 0.3 * cddn$$

$$\delta_{Ад} = -55.3 - 0.18 * slp - 1.6 * tpi1500 + 0.9 * cnd + 2.8 * lsf + 4.4 * twi - 20.9 * cdep + 0.4 * cddn$$

Чем выше значение  $\delta$ , тем профиль почвы элемента  $i, j$  ближе к среднему профилю  $k$ -почвы в признаковом пространстве. Значение

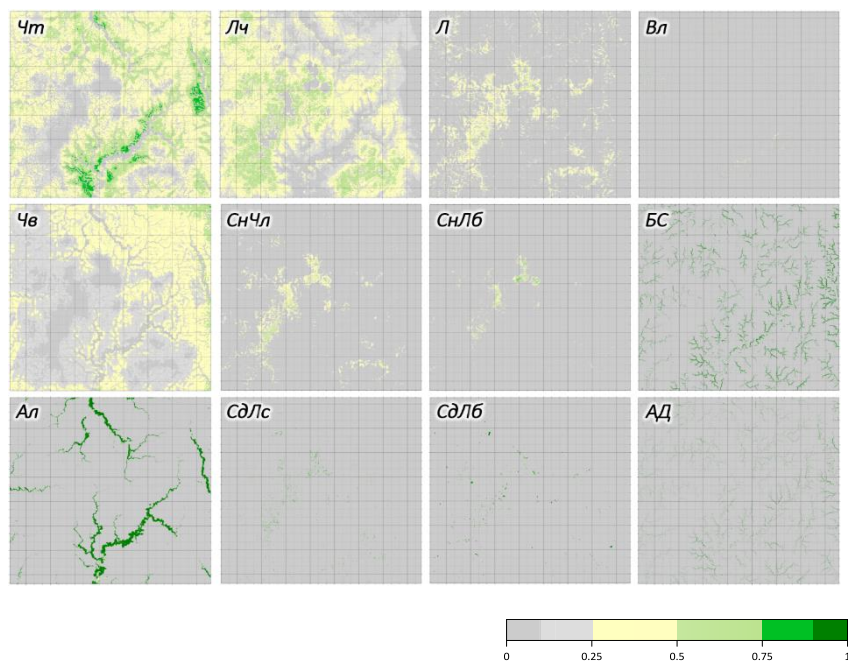
ния  $\delta_k$  используются для расчета апостериорных вероятностей по формуле Байеса:

$$S_{ij}(G_k|x) = \frac{\exp(\delta_k(x))}{\sum_{n=1}^K \exp(\delta_n(x))},$$

где  $\delta_k$  – дискриминантная функция  $k$ -класса,  $\sum_{n=1}^K \exp(\delta_n(x))$  – сумма значений во всех классах (для нормирования).

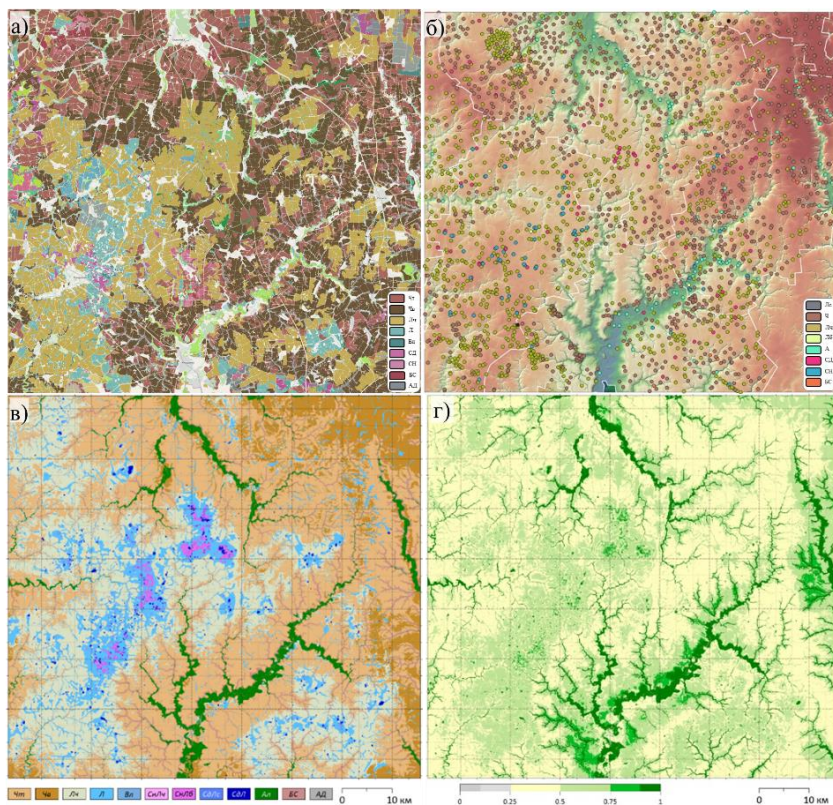
Последующий анализ вектора  $S_{ij}$  для каждого элемента регулярной сетки  $i, j$  позволяет получить: 1) наиболее вероятную (преобладающую по площади) почвенную категорию; 2) неопределенность ее однозначного прогноза, как значение максимальной условной вероятности из всех возможных  $S_{ij}$ ; 3) типы сочетаний наиболее вероятной (преобладающей) почвенной категории с двумя–тремя сопутствующими. Изображение отдельных значений вектора  $S_{ij}$  отражает компонентный состав почвенного покрова участка (рис. 6); изображение наиболее вероятной почвенной категории (рис. 7в) – ареалы преобладающей почвы; изображение неопределенности ее однозначного прогноза – степень комплексности почвенного покрова (рис. 7г), а изображение типов сочетаний преобладающих и сопутствующих категорий почвы – ареалы почвенных комбинаций, образованных этими категориями (рис. 8, табл. 5).

Фоновые почвы междуречья – черноземы типичные, выщелоченные и лугово-черноземные (рис. 7а–в). Пятнистости Чт и Чв занимают дренируемые придолинные участки междуречных равнин, сочетания Лч, Чт и Чв – замедленно-дренируемые. К центральным недренируемым частям междуречий приурочены комплексы луговых почв с солонцами лугово-черноземными и лугово-болотными; а также с солодами лугово-степными и степными в элементах западного комплекса. Кроме того, сочетания луговых и лугово-черноземных почв с участием солонцов характерны для водосборных понижений овражно-балочной сети, а также – выложенных частей притеррасных склонов с близким залеганием грунтовых вод. Почвы балочных склонов и аллювиально-делювиальные почвы балок приурочены к элементам овражно-балочной сети, а аллювиальные почвы – к поймам рек.



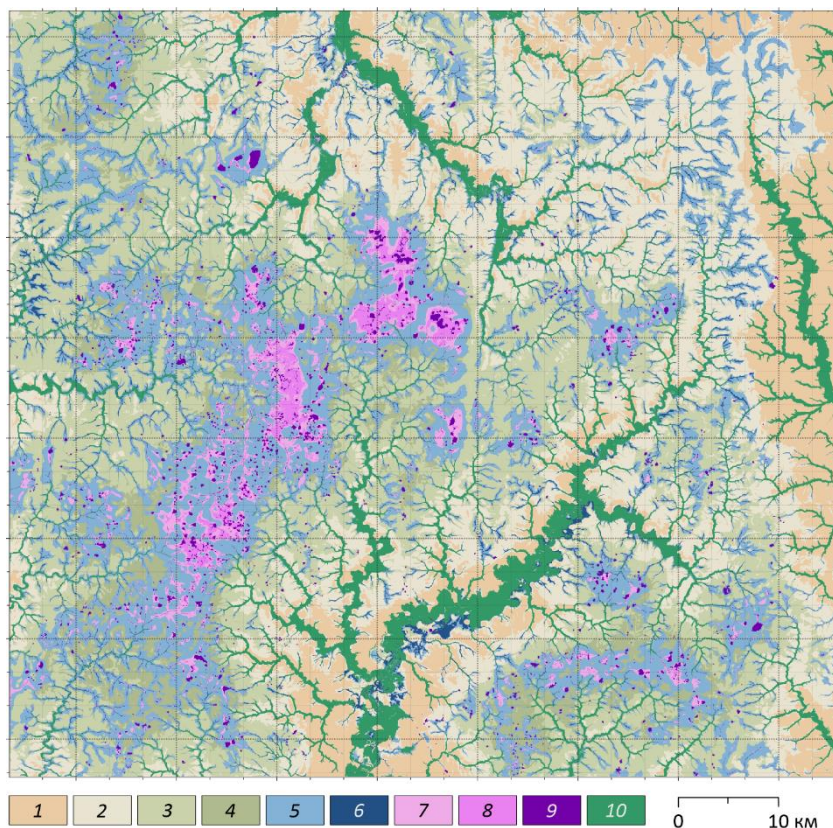
**Рис. 6.** Компонентный состав почвенного покрова Битуго-Савала-Цнинского междуречья Окско-Донской низменности – долевое участие почв в составе почвенных комбинаций: *Чт* – чернозем типичный, *Чв* – чернозем выщелоченный, *Лч* – лугово-черноземная, *Л* – луговая, *Вл* – влажно-луговая, *СдЛс* – солодь лугово-степная, *СдЛ* – солодь луговая, *СнЛч* – солонец лугово-черноземный, *СнЛб* – солонец лугово-болотный, *Ал* – аллювиальная, *БС* – почвы балочных склонов, *АД* – аллювиально-делювиальные почвы днищ оврагов и балок.

**Fig. 6.** Components of the soil cover of the Bitug-Savala-Tsna interfluvium – the share of soils in soil combinations: *Чт* – typical chernozem, *Чв* – leached chernozem, *Лч* – meadow-chernozem, *Л* – meadow, *Вл* – wet-meadow, *СдЛс* – meadow-steppe solonetz, *СдЛ* – meadow solonetz, *СнЛч* – meadow-chernozem solonetz, *СнЛб* – meadow-bog solonetz, *Ал* – alluvial, *БС* – soils of ravine slopes, *АД* – alluvial-deluvial soils of the bottoms of ravines and gullies.



**Рис. 7.** Доминантный компонент почвенных комбинаций Битюго-Савала-Цнинского междуречья: *а)* по архивным материалам почвенных обследований; *б)* точки опорных разрезов, *в)* доминантный подтип почв по модели; *г)* его долевое участие в составе комбинации почв.

**Fig. 7.** Dominant component of soil combinations of the Bityug-Savala-Tsna interfluvium: *a)* dominant soil subtype according to archival materials of soil surveys; *б)* points of archive soil descriptions, *в)* dominant soil subtype according to the model; *г)* its share in the composition of the soil combination.



**Рис. 8.** Типы почвенных комбинаций Битюг-Савала-Цнинского междуречья Окско-Донской низменности: 1 – Чт·Чв и Чв·Чт с Лч (до 10%); 2 – тоже с Лч (10–25%); 3 – тоже с Лч (25–50%); 4 – тоже с Лч (более 50%); 5 – Л и Лч; 6 – ВЛ и Л; 7 – Л с СН (10–50%); 8 – СН (более 50%) с Л в том числе солонцеватыми; 9 – СДлс и СДл; 10 – почвы овражно-балочной сети и речных долин (АЛ, БС, АД).

**Fig. 8.** Soil combinations of the Bitjug-Saval-Tsna interfluvium: 1 – Чт·Чв and Чв·Чт with Лч (up to 10%); 2 – also with Лч (10–25%); 3 – also with Лч (25–50%); 4 – also with Лч (more than 50%); 5 – Л and Лч; 6 – Вл and Л; 7 – Л with СН (10–50%); 8 – СН (more than 50%) with Л including solonetz; 9 – СДлс and СДл; 10 – soils of the gully-ravine network and river valleys (АЛ, БС, АД).

**Таблица. 5.** Типы почвенных комбинаций Битюго-Савала-Цнинского междуречья Окско-Донской Низменности (легенда к рис. 8)

**Table 5.** Soil combinations of the Bityug-Saval-Tsna interfluvium (fig. 8)

Микроструктуры		S, %	Состав и соотношение компонентов						Дополнительно
			Чт	Чв	Лч	Л	ВЛ	СЛ	
1	Чт·Чв и Чв·Чт	11	≥ 90			<10			Лч < 10%
2	Ч Лч (10-25)	23							Лч 10-25%
3	Ч Лч (25-50)	26							Лч 25-50%
4	Лч Чт Чв	8							Лч ≥ 50%
5	Л ВЛ	9	<10		≥90		<10		Л ≥ Лч и Лч ≥ ВЛ
6	ВЛ	4			ВЛ ≥ Лч и ВЛ ≥ Л				
7	СН (10-50)	7	<10		>50		10-50	<10	СН ≥ 10 и С < 50
8	СН (50+)	2			<50		>50		СН ≥ 50
9	СД	1			<10			≥10	
10	Ал БС Ад	9	<10						Ал>10 или БС>10 или Ад>10

**Примечание.** \* Чв – чернозем выщелоченный, Чт – чернозем типичный, Лч – лугово-черноземная почва, Л – луговая, ВЛ – влажно-луговая, СДлс – солодь лугово-степная, СДл – солодь луговая, СНлч – солонец лугово-черноземный, СНлб – солонец лугово-болотный, Ал – аллювиальная, БС – почвы балочных склонов, Ад – аллювиально-делювиальные почвы днищ оврагов и балок.

**Note.** \* Чв – leached chernozem, Чт – typical chernozem, Лч – meadow-chernozem, Л – meadow, ВЛ – wet-meadow, СДлс – meadow-steppe solod, СДл – meadow solod, СНлч – meadow-chernozem solonetz, СНлб – meadow-marsh solonetz, Ал – alluvial, БС – gully slope soils, Ад – alluvial-deluvial soils of ravine and gully bottoms.

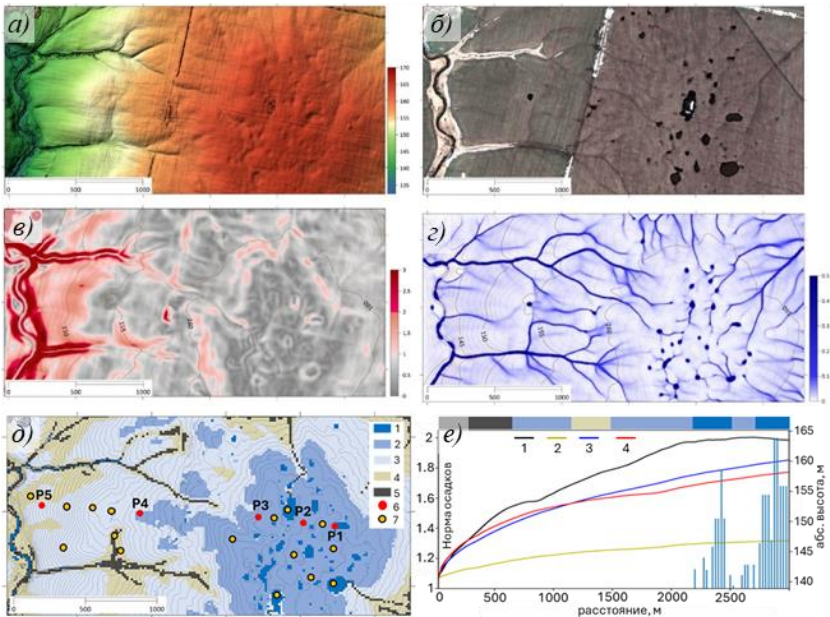
Высокую ценность имеет карта неопределенности прогноза доминантной почвы в составе почвенных комбинаций (рис. 7г). Она показывает участки с высокой и низкой комплексностью почвенного покрова. В региональных условиях лесостепи Окско-Донской низменности очень высокая степень комплексности почвенного покрова характерна для пологих прибалочных и придолинных склонов с трехкомпонентными пятнистостями с черноземами типичными, выщелоченными и лугово-черноземными почвами. Наименьшая комплексность приурочена к поймам крупных

рек с преобладанием аллювиальных почв и вершинам плоских междуречий с лугово-болотными почвами и солодями. Карта неопределенности прогноза позволит более подробно изучать участки с высокой неопределенностью полевыми методами, что эффективнее случайной или регулярной выборки.

Структура почвенного покрова Битюго-Савала-Цнинского междуречья подчинена градиенту увлажнения его эдафических условий – от черноземов дренируемых придолинных частей междуречных равнин, через увеличение доли лугово-черноземных почв (от 10% до 50% и более) в составе почвенных комбинаций по мере снижения дренируемости рельефа до комплекса луговых и влажно-луговых почв с участием солонцов луговых и лугово-болотных в центральных недренируемых частях междуречий. Тот же градиент характерен для крупных водосборных понижений овражно-балочной сети – по мере концентрации стока происходит увеличение луговости почв с переходом к влажно-луговым почвам. По площади преобладают зональные микрокомбинации почв плакоров – 60%, микроструктуры с преобладанием полугидроморфных почв занимают 8%, гидроморфных – 23%, овражно-балочного и долинного комплекса – 9% (табл. 5).

Наглядное представление организации почвенного покрова Окско-Донской низменности дает почвенно-топографическая съемка ее локального междуречья и результаты численного моделирования водного режима его почв в градиенте поверхностного и грунтового увлажнения (рис. 9). Перехватывая поверхностный сток, западинный комплекс обеспечивает до 150 мм дополнительного внутripочвенного стока, оказывая влияние на водный режим почв за счет повышения уровня грунтовых вод на 2 м и формирование луговых почв (Fil et al., 2021; Филь, 2025). Черноземы типичные и выщелоченные распространены только в пределах придолинных наиболее дренируемых частей междуречья. В переходной полосе формируются лугово-черноземные почвы.

Сравнение результатов цифрового картографирования почвенного покрова Битюго-Савала-Цнинского междуречья (рис. 10 а–в) с архивными почвенными картами хозяйств Сампурского района 1980-х годов М 1 : 10 000 (рис. 10г) показывает их общее подобие и одновременно существенные различия.



**Рис. 9.** Детальная почвенно-топографическая съемка ключевого участка “Ивановка” и особенности формирования его поверхностного и внутрипочвенного стока (Fil et al., 2021; Филь, 2025): *а)* гипсометрия по результатам воздушной съемки; *б)* космический снимок с затопленными понижениями западного комплекса после окончания снеготаяния; *в)* крутизна мезорельефа, °; *г)* перераспределенный слой стока атмосферных осадков, м; *д)* тип/подтип почв: 1 – влажно-луговые осолоделые, 2 – луговые, 3 – лугово-черноземные, 4 – комплекс слабосмытых типичных и выщелоченных черноземов, 5 – почвы овражно-балочного комплекса, 6–7 – точки описаний; *е)* модельный расчет уровня грунтовых вод вдоль catena с учетом перехвата поверхностного стока западным комплексом недrenируемых междуречий (высота голубых столбиков, левая ось) и без его учета: 1 – профиль рельефа, м (правая ось); 2 – профиль кровли морены; расчетный уровень грунтовых вод с учетом (3) и без учета (4) перехвата поверхностного стока западным комплексом.

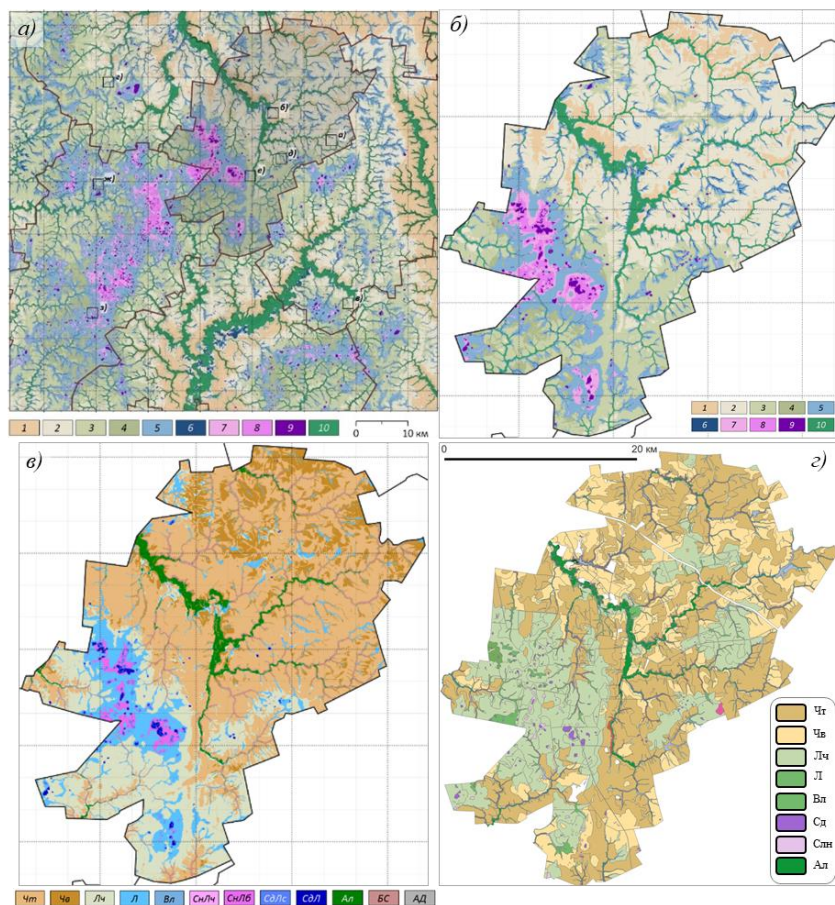
**Fig. 9.** Detailed soil and topographic survey of the Ivanovka key site and the formation features of its surface and subsurface runoff (Fil et al., 2021; Fil, 2025): *a)* topography based on aerial photography; *б)* satellite image with

flooded depressions of the depression complex after the end of snowmelt; **б**) steepness of mesorelief, °; **з**) redistributed layer of atmospheric precipitation runoff, m; **д**) soil type/subtype: 1 – wet meadow solodized, 2 – meadow, 3 – meadow-chernozem, 4 – complex of slightly eroded typical and leached chernozems, 5 – soils of the ravine-gully complex, 6–7 – description points; **е**) model calculation of the groundwater level along the catena taking into account the interception of surface runoff by the depression complex of undrained interfluves (height of blue columns, left axis) and without taking it into account: 1 – relief profile, m (right axis); 2 – moraine roof profile; calculated groundwater level taking into account (3) and without taking into account (4) the interception of surface runoff by the depression complex of undrained interfluves.

Схожими являются ареалы черноземных почв и их полугидроморфных аналогов – лугово-черноземных почв. Черноземы распространены преимущественно на дренируемых равнинах правобережья Цны, лугово-черноземные почвы – в пределах замедленно дренируемых междуречий Цны и Битюга, Цны и Савалы. На правобережье Цны область этих почв на цифровой модели ниже по сравнению архивными картами, а на Савала-Цнинском междуречье существенно выше. Выше на цифровой модели и площадь недренируемых междуречий с преобладанием луговых почв и солонцов, а также солодей в составе западного комплекса.

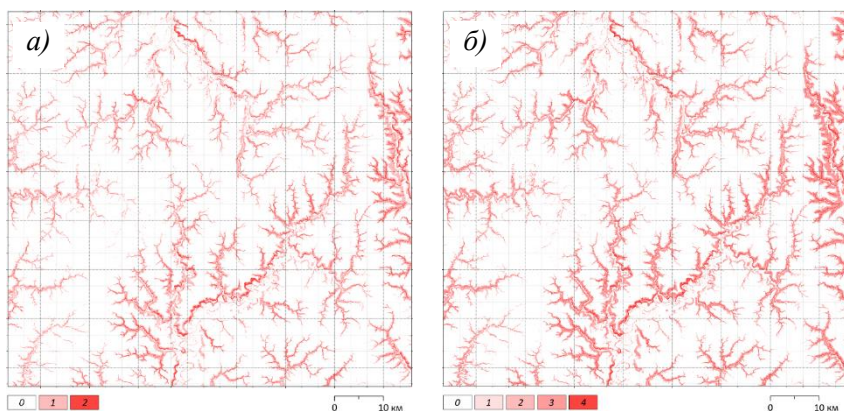
Необходимо отметить, что на архивных почвенных картах ареалы солонцов крайне невелики, встречаются лишь отдельные разрезы и небольшие контуры. В то время как на цифровой модели они имеют значительную площадь. Классификационная принадлежность и закономерности распространения солонцовых комплексов являются предметом дополнительных региональных исследований на ключевых участках (Smirnova et.al., 2025).

Степень агрогенной трансформации почвенного покрова Битюго-Савала-Цнинского междуречья в результате водной эрозии на пашне невелика (рис. 11) – слабосмытые почвы занимают 14 124 га (3%), среднесмытые 4 346 га (1%). Как и для таксонов почв использован метод линейного дискриминантного анализа, где в качестве предикторов использована геоморфометрия рельефа и расчетные темпы смыва почв. Точность модели 90%.



**Рис. 10.** Сравнение региональной модели почвенного покрова Битюго-Савала-Цнинского междуречья и архивных почвенных карт хозяйств М 1 : 10 000 ГФДЗ: *а)* цифровая карта микроструктур почвенного покрова (рис. 8) с границами районов Тамбовской области и тестовых участков  $2 \times 2$  км (рис. 11), *б)* ее фрагмент в границах Сампурского района; *в)* фрагмент цифровой карты доминантной почвы в составе почвенных комбинаций (рис. 7в); *з)* тип/подтип почв на архивных почвенных картах М 1 : 10 000.

**Fig. 10.** Comparison of the regional soil cover model of the Bityug-Savala-Tsna interfluve and archival soil maps of farms on a scale of 1 : 10,000: *a*) digital map of soil combinations (fragment of Fig. 8) with the boundaries of districts of the Tambov region and 2 × 2 km test plots (Fig. 11), *б*) its fragment within the boundaries of the Sampursky district; *в*) fragment of the digital map of the dominant soil in the composition of soil combinations (fragment Fig. 7в); *г*) soil type/subtype on the archival soil maps of farms in the Sampursky district on a scale of 1 : 10,000 of the Tambov region.



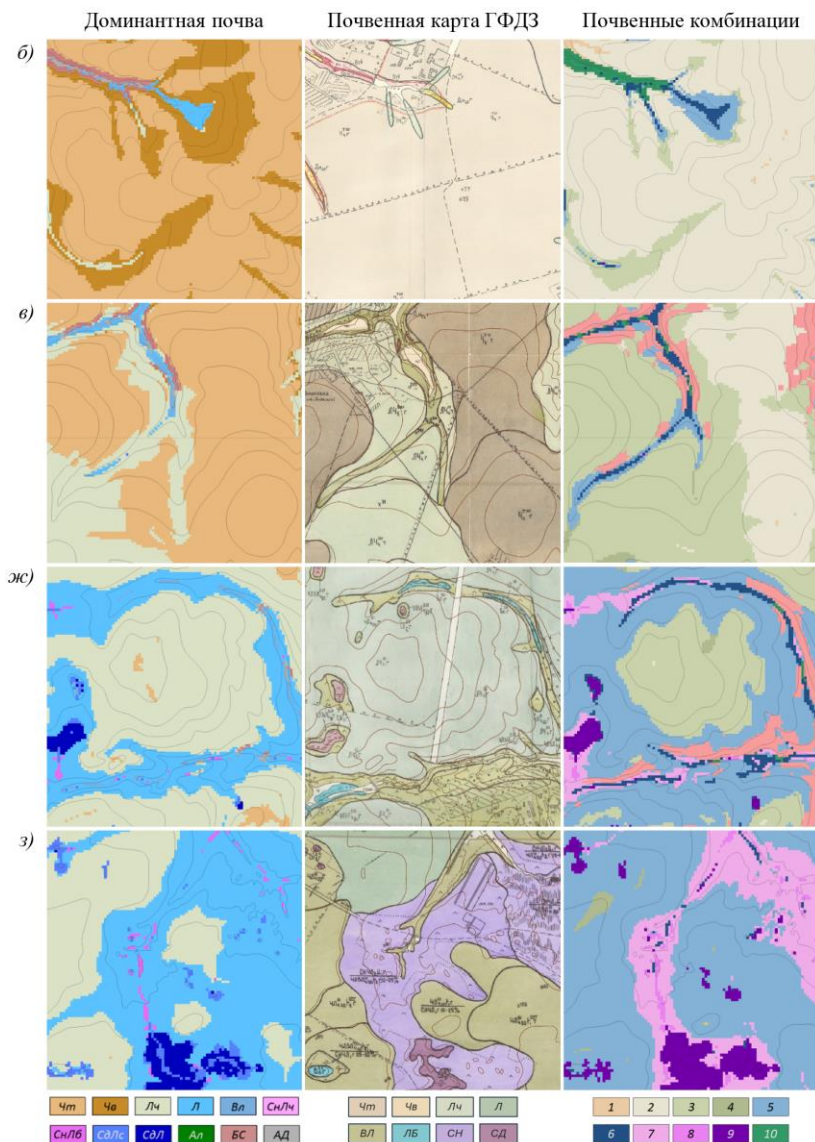
**Рис. 11.** Эрозионные почвенные комбинации пашни: *a*) преобладающая в составе ПК категория смытости почв (*0* – не смытые (Э0), *1* – слабосмытые (Э1), *2* – среднесмытые (Э2)), *б*) типы почвенных комбинаций: *0* – зональные с преобладанием несмытых почв ( $E_0 > 0.9$ ); *1* – эрозионно-зональные с долей смытых почв 0.1–0.25; *2* – слабоэродированные Э1(0.25–0.5); *3* – среднеэродированные ( $E_1 + E_2 \geq 0.5$  и  $E_1 \geq E_2$ ); *4* – сильноэродированные ( $E_1 + E_2 \geq 0.5$  и  $E_1 < E_2$ ).

**Fig. 11.** Erosive soil combinations of arable land: *a*) the predominant soil erosion category in the soil combination (*0* – not eroded (E0), *1* – slightly eroded (E1), *2* – moderately eroded (E2)), *б*) types of soil combinations: *0* – zonal with predominance of uneroded soils ( $E_0 > 0.9$ ); *1* – erosion-zonal with the proportion of eroded soils 0.1–0.25; *2* – slightly eroded E1 (0.25–0.5); *3* – moderately eroded ( $E_1 + E_2 \geq 0.5$  and  $E_1 \geq E_2$ ); *4* – highly eroded ( $E_1 + E_2 \geq 0.5$  and  $E_1 < E_2$ ).

Ареалы смытых почв имеют вытянутую форму вдоль пологих и покатых склонов долин рек Цна и Савала и их притоков. Итоговое картографическое отображение структуры почвенного покрова региона представляет собой наложение типизированных неэрозионных (рис. 10а) и эрозионных (рис. 11б) почвенных комбинаций.

Сравнение числовой и экспертной моделей почвенно-ландшафтных связей на локальном уровне выполнено в границах участков  $2 \times 2$  км (рис. 10а, рис. 12).

Ареалы доминантных почв на числовой (левые фрагменты на рис. 12) и экспертной (центральные фрагменты) моделях демонстрируют хорошую сходимость для черноземов, лугово-черноземных почв и почв западного комплекса, удовлетворительную для луговых и солонцовых почв. В большинстве случаев границы ареалов численной модели лучше увязаны с положением в мезорельефе по сравнению с экспертными. Высокую научную и практическую ценность имеют карты почвенных комбинаций (правые фрагменты), отражающие доленое участие доминантных и субдоминантных компонентов. Они в большей степени, нежели карты доминантных почв, отражают особенности ареалов зональных почв и их смену в ряду возрастающего увлажнения (рис. 12а, ж, з) или степени деградированности от водной эрозии (рис. 12в, ж) и имеют более высокую ценность для точного земледелия и оптимизации структуры землепользований. Необходимо отметить высокую роль экспертной оценки при верификации моделей почвенно-ландшафтных связей и карт, построенных на их основе. В этой связи для почвенного картографирования в методологии структуры почвенного покрова необходимо исследовать возможности применения численных метрик рисунков структуры почвенного покрова для формальной оценки результатов моделирования.



**Рис. 12.** Локальное сравнение фрагментов региональной модели почвенного покрова Битюго-Савала-Цнинского междуречья и архивных почвенных карт хозяйств М1:10 000 ГФДЗ в границах участков 2 × 2 км

(рис. 10а): *(слева)* – фрагменты цифровой карты доминантной почвы в составе почвенных комбинаций; *(в центре)* – тип/подтип почв на архивных почвенных картах хозяйств Тамбовской области М 1 : 10 000 ГФДЗ; *(справа)* – фрагменты цифровой карты почвенных комбинаций.

**Fig. 12.** Local comparison of fragments of the regional soil cover model of the Bituyug-Saval-Tsna interfluve and archival soil maps of farms on a scale of 1 : 10,000 within the boundaries of 2 × 2 km plots: *(left)* – fragments of the digital map of the dominant soil as part of soil combinations; *(center)* – soil type/subtype on the archival soil maps of farms in the Tambov region on a scale of 1 : 10,000; *(right)* – fragments of the digital map of soil combinations.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Слабопересеченный рельеф и породы с низкой фильтрационной способностью междуречий Окско-Донской низменности определили условия затрудненного поверхностного и внутрипочвенного стока и, как следствие, преобладание в структуре их почвенного покрова полугидроморфных и гидроморфных почв черноземного ряда с участием солонцов и почв западного комплекса (лугово-болотных или солодей). Региональное разнообразие почвенного покрова Битуюго-Савала-Цнинского междуречья сведено к десяти типам микроструктур с учетом их компонентного состава.

Ведущими факторами дифференциации почвенного покрова региона являются: крутизна склонов и превышения (разделяющие автоморфные и гидроморфные позиции), плотность и глубина западин (индицируют западинный комплекс), а также превышение над базисом эрозии (маркирует почвы речных долин).

Экспертное сравнение цифровой модели с архивными картами показало хорошую сходимость в выделении ареалов черноземных, лугово-черноземных и гидроморфных почв, но завышение площади ареалов солонцовых почв. При этом границы почвенных контуров на цифровой карте лучше согласованы с элементами мезорельефа.

Дальнейшее развитие данного направления почвенной картографии связано с совершенствованием методов моделирования и снижения неопределенности источников пространственной информации, увеличением полноты обучающей выборки для корректной характеристики состава и соотношения компонентов почвенных комбинаций в признаковом и территориальном простран-

стве, а также формализацией способов верификации результатов на ключевых участках с минимизацией полевых обследований.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Величко А.А., Морозова Т.Д., Нечаев В.П., Порожнякова О.М.* Палеокриогенез, почвенный покров и земледелие. М.: Наука, 1996. 150 с.
2. Единый государственный реестр почвенных ресурсов России. Версия 1.0. Коллективная монография. М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева Россельхозакадемии, 2014. 768 с.
3. Классификация и диагностика почв СССР. М.: Колос, 1977. 224 с.
4. *Козлов Д.Н., Сорокина Н.П.* Традиции и инновации в крупномасштабной почвенной картографии // Цифровая почвенная картография: теоретические и экспериментальные исследования. М.: Изд-во Почвенный ин-т им. В.В.Докучаева, 2012. С. 35–57.
5. *Козлов Д.Н., Жидкин А.П., Лозбенев Н.И.* Цифровое картографирование эрозийных структур почвенного покрова на основе имитационной модели смыва (северная лесостепь Среднерусской возвышенности) // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2019. № 100. С. 5–35. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2019-100-5-35>.
6. *Минаев Н.В., Никитин А.А., Козлов Д.Н.* Идентификация масштабных уровней организации рельефа пашни // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2019. № 96. С. 3–21. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2019-96-3-21>.
7. *Мильков Ф.Н.* Окско-Донское плоскогорье. Воронеж: Изд-во ВГУ, 1976. 176 с.
8. Природно-сельскохозяйственное районирование и использование земельного фонда СССР. М.: Колос, 1983. 336 с.
9. *Савин И.Ю.* Методология крупномасштабного картографирования почв: подходы, проблемы и перспективы // Почвоведение. 2025. № 10. С. 1243–1251. DOI: <https://doi.org/10.7868/S3034561825100011>.
10. *Самойлова Е.М.* Луговые почвы лесостепи. М.: Изд-во МГУ, 1981. 283 с.
11. *Сорокина Н.П., Козлов Д.Н.* Возможности цифрового картографирования структуры почвенного покрова // Почвоведение. 2009. № 2. С. 198–210.
12. *Филь П.П.* Влияние западных урочищ на гидрологическое функционирование лесостепных ландшафтов Окско-Донской низменности: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. М., 2025. 26 с.

13. *Bell J.C., Cunningham R.L., Havens M.W.* Calibration and validation of a soil-landscape model for predicting soil drainage class // Soil Science Society of America Journal. 1992. Vol. 56. No. 6. P. 1860–1866.
14. *Bishop T.F.A., Minasny B., McBratney A.B.* Uncertainty analysis for soil-terrain models // International Journal of Geographical Information Sciences. No. 20. 2006. P. 117–134.
15. *Conrad O., Hartl P., Geschke A.* SAGA GIS 2.1.4 // Geoscientific Model Development. 2015. No. 8. P. 1997–2007.
16. *Fil P.P., Yurova A.Y., Dobrokhotov A., Kozlov D.* Estimation of infiltration volumes and rates in seasonally water-filled topographic depressions based on remote-sensing time series // Sensors. 2021. Vol. 21. P. 7403. DOI: <https://doi.org/10.3390/s21217403>.
17. *Fridland V.M.* Pattern of the Soil Cover. Israel Program for Scientific Translations. 1976. 291 p.
18. *Hole F.D., Campbell J.B.* Soil Landscape Analysis. 1985. 196 p.
19. *Koshel S.* Algorithm for Topologically Correct Gridding of Contour Data // Proceedings of Seventh International Conference on Geographic Information Science (GIScience 2012). Columbus OH, 2012. P. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2131.8561>.
20. *Kozlov D., Lozbenev N., Levchenko E.* Soil combinations as an object of DSM: a case study in chernozems area of the Russian Plain // GlobalSoilMap – Digital Soil Mapping from Country to Globe. CRC Press, 2018. 7 p.
21. *Malone B.P., McBratney A.B., Minasny B.* Empirical estimates of uncertainty for mapping continuous depth functions of soil attributes // Geoderma. 2011. No. 160 (3–4). P. 614–626. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.11.013>.
22. *McBratney A.B., Mendonça Santos M.L., Minasny B.* On digital soil mapping // Geoderma. 2003. No. 117 (1–2). P. 3–52.
23. *Minasny B., McBratney A.B.* Digital soil mapping: A brief history and some lessons // Geoderma. 2016. Vol. 264. Part B. P. 301–311. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.07.017>.
24. *Qi F., Zhu A.X.* Comparing three methods for modeling the uncertainty in knowledge discovery from area-class soil maps // Computers and Geosciences. Vol. 37 (9). 2011. P. 1425–1436. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2010.10.016>
25. *Scarpone C., Schmidt M.G., Bulmer C.E., Knudby A.* Modelling soil thickness in the critical zone for Southern British Columbia // Geoderma. 2016. No. 282. P. 59–69.
26. *Smirnova M.A., Lozbenev N.I., Levchenko E.A., Fil P.P., Kozlov D.N.* Chernozems of eastern european forest-steppe lowland landscapes:

Morphology, classification and spatial distribution // *Geoderma Regional*. 2025. Vol. 41. e00965

27. Vermeulen D., Van Niekerk A. Machine learning performance for predicting soil salinity using different combinations of geomorphometric covariates // *Geoderma*. 2017. No. 299. P. 1–12

28. Webster R., Burrough P.A. Multiple discriminant analysis in soil survey // *European Journal of Soil Science*. 1974. Vol. 25 (1). P. 120–134.

## REFERENCES

1. Velichko A.A., Morozova T.D., Nechaev V.P., Porozhnyakova O.M., *Paleokriogeneza, pochvennyy pokrov i zemledeliye* (Paleocryogenesis, soil cover and agriculture), Moscow: Nauka, 1996, 150 p.

2. *Edinyj gosudarstvennyj reestr pochvennyh resursov Rossii* (Unified State Register of Soil Resources of Russia), Version 1.0, Moscow: V.V. Dokuchaev Soil Science Institute of the Russian Agricultural Academy, 2014, 768 p.

3. *Klassifikaciya i diagnostika pochv SSSR* (Classification and Diagnostics of Soils of the USSR), Moscow: Kolos, 1977, 224 p.

4. Kozlov D.N., Sorokina N.P., Traditions and innovations in large-scale soil mapping, In: *Digital soil mapping: theoretical and experimental studies*, Moscow: Izd-vo Pochvnyy in-t im. V.V. Dokuchayeva, 2012, pp. 35–57.

5. Kozlov D.N., Zhidkin A.P., Lozbenov N.I., Digital mapping of soil cover eroded patterns on the basis of soil erosion simulation model (northern forest-steppe of the Central Russian Upland), *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2019, Vol. 100, pp. 5–35, DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2019-100-5-35>.

6. Minayev N.V., Nikitin A.A., Kozlov D.N., The scale levels identification for the plowland topography organization, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2019, Vol. 96, pp. 3–21, DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2019-96-3-21>.

7. Milkov F.N., *Oksko-Donskoe ploskomet'e* (Oka-Don flat land), Voronezh: Izd-vo VGU, 1976, 176 p.

8. *Prirodno-sel'skohozyajstvennoe rajonirovanie i ispol'zovanie zemel'nogo fonda SSSR* (Natural and agricultural zoning and use of the land fund of the USSR), Moscow: Kolos, 1983, 336 p.

9. Savin I.Yu., Large-scale soil mapping methodology: approaches, challenges, and prospects, *Eurasian Soil Science*, 2025, Vol. 58, 134, DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229325600897>.

10. Samoylova E.M., *Lugovye pochvy lesostepi* (Meadow soils of the forest-steppe), Moscow: Izd-vo MSU, 1981, 283 p.

11. Sorokina N.P., Kozlov D.N., Vozmozhnosti tsifrovogo kartografirovaniya struktury pochvnogo pokrova (Possibilities of digital mapping of the soil cover structure), *Pochvovedenie*, 2009, No. 2, pp. 198–210.

12. Fil P.P., *Vliyaniye zapadinykh urochishch na gidrologicheskoye funktsionirovaniye lesostepnykh landshaftov Oksko-Donskoy nizmennosti: Avtoref. dis. ... kand. s.-kh. nauk* (The influence of depressions on the hydrological functioning of forest-steppe landscapes of the Oka-Don Lowland, Extended abstract of candidate thesis), 2025, 26 p.
13. Bell J.C., Cunningham R.L., Havens M.W., Calibration and validation of a soil-landscape model for predicting soil drainage class, *Soil Science Society of America Journal*, 1992, Vol. 56(6), pp. 1860–1866.
14. Bishop T.F.A., Minasny B., McBratney A.B., Uncertainty analysis for soil-terrain models, *International Journal of Geographical Information Sciences*, 2006, No. 20, pp. 117–134.
15. Conrad O., Hartl P., Geschke A., SAGA GIS 2.1.4, *Geoscientific Model Development*, 2015, No. 8.
16. Fil P.P., Yurova A.Y., Dobrokhotov A., Kozlov D., Estimation of infiltration volumes and rates in seasonally water-filled topographic depressions based on remote-sensing time series, *Sensors*, 2021, Vol. 21, p. 7403.
17. Fridland V.M., *Pattern of the Soil Cover*, Israel program for scientific translations, 1976, 291 p.
18. Hole F.D., Campbell J.B., *Soil Landscape Analysis*, 1985, 196 p.
19. Koshel S., Algorithm for topologically correct gridding of contour data, *Proceedings of GIScience*, 2012, pp. 1–5.
20. Kozlov D., Lozbenev N., Levchenko E., Soil combinations as an object of DSM: a case study in chernozems area of the Russian Plain, In: *GlobalSoilMap – Digital Soil Mapping from Country to Globe*, CRC Press, 2018.
21. Malone B.P., McBratney A.B., Minasny B., Empirical estimates of uncertainty for mapping continuous depth functions of soil attributes, *Geoderma*, 2011, Vol. 160 (3–4), pp. 614–626.
22. McBratney A.B., Mendonça Santos M.L., Minasny B., On digital soil mapping, *Geoderma*, 2003, No. 117 (1–2), pp. 3–52.
23. Minasny B., McBratney A.B., Digital soil mapping: A brief history and some lessons, *Geoderma*, 2016, Vol. 264, Part B, pp. 301–311.
24. Qi F., Zhu A.X., Comparing three methods for modeling the uncertainty in knowledge discovery from area-class soil maps, *Computers and Geosciences*, 2011, Vol. 37 (9), pp. 1425–1436.
25. Scarpone C., Schmidt M.G., Bulmer C.E., Knudby A., Modelling soil thickness in the critical zone for Southern British Columbia, *Geoderma*, 2016, No. 282, pp. 59–69.
26. Smirnova M.A., Lozbenev N.I., Levchenko E.A., Fil P.P., Kozlov D.N., Chernozems of eastern european forest-steppe lowland landscapes:

Morphology, classification and spatial distribution, *Geoderma Regional*, 2025, Vol. 41.

27. Vermeulen D., Van Niekerk A., Machine learning performance for predicting soil salinity using different combinations of geomorphometric covariates, *Geoderma*, 2017, No. 299, pp. 1–12.

28. Webster R., Burrough P.A., Multiple discriminant analysis in soil survey, *European Journal of Soil Science*, 1974, Vol. 25 (1), pp. 120–134.

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2026-127-39-61



**Ссылки для цитирования:**

Болотов А.Г., Калнина А.И., Шеин Е.В., Дембовецкий А.В., Калиниченко Р.В., Филь П.П. Водный режим почвенного покрова агроландшафта для агроэкологической группировки земель // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2026. Вып. 127. С. 39-61. DOI: 10.19047/0136-1694-2026-127-39-61

**Cite this article as:**

Bolotov A.G., Kalnina A.I., Shein E.V., Dembovetskiy A.V., Kalinichenko R.V., Phil P.P., The water regime of the soil cover of the agricultural landscape and its components (using the example of the VNIIMZ experimental field in the Tver region), Dokuchaev Soil Bulletin, 2026, V. 127, pp. 39-61, DOI: 10.19047/0136-1694-2026-127-39-61

**Благодарность:**

Исследования проведены по темам госзадания: FGUR-2025-0008 “Оптимизация сельскохозяйственного землепользования по экологическим и экономическим условиям в контексте современных вызовов” и “Физические основы экологических функций почв: технологии мониторинга, прогноза и управления” ЦИТИС: 121040800146-3.

Авторы выражают благодарность Лозбенеvu Н.И., Козлову Д.Н., Хитрову Н.Б., Шилову П.М. за предоставленную карту агроэкологических видов земель (Лозбенеv и др., 2024).

**Acknowledgments:**

The research was conducted on the topics of the State Assignment: FGUR-2025-0008 “Optimization of agricultural land use under environmental and economic conditions in the context of modern challenges” and “Physical foundations of ecological functions of soils: monitoring, forecasting, and management technologies” (CITIS: 121040800146-3).

The authors express their gratitude to Lozbenev N.I., Kozlov D.N., Khitrov N.B., and Shilov P.M. for providing the map of agroecological land types (Lozbenev et al., 2024).

**Водный режим почвенного покрова  
агроландшафта для агроэкологической  
группировки земель**

© 2026 г. А. Г. Болотов<sup>1</sup>, А. И. Калнина<sup>1</sup>, Е. В. Шеин<sup>1,2,3\*</sup>,  
А. В. Дембовецкий<sup>2</sup>, Р. В. Калиниченко<sup>1</sup>, П. П. Филь<sup>1</sup>

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

\* <https://orcid.org/0000-0002-0101-5293>, e-mail: [evgeny.shein@gmail.com](mailto:evgeny.shein@gmail.com).

<sup>2</sup>МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия,  
119991, Москва, Ленинские горы, 1.

<sup>3</sup>Верхневолжский федеральный аграрный научный центр, Россия,  
601261, Владимирская обл., Суздальский р-н, п. Новый,  
ул. Центральная, д. 3.

Поступила в редакцию 12.05.2025, после доработки 05.06.2025,  
принята к публикации 27.01.2026

**Резюме:** Рассматриваются вопросы классификаций, формирования и выделения различных водных режимов в пространстве сельскохозяйственного поля с осушенными гончарным дренажем агродерново-подзолистыми почвами разной степени гидроморфизма на двучлене (Опытное поле ВНИИМЗ, около 52 га). Разделение водных режимов проведено с помощью пространственно распределенной физически обоснованной модели SWAT на базе программы QGIS и послойно экспериментально определенных гранулометрического состава, содержания органического вещества, плотности почв, карты рельефа и метеоданных за 2020–2022 гг. Выделено 7 элементарных гидрологических ареалов, которые отнесены к агроэкологическим видам и типам земель и определяются не только условиями водопереноса по поверхности почвы, но и обуславливаются внутripочвенными факторами: глубинами горизонтов, их гранулометрическим составом и проницаемостью подпочвенных горизонтов. Данные гидрологические участки отличаются интенсивностью водообмена, находятся в пределах земель, обладающих разной степенью гидроморфности: от сильнополугидроморфно-литогенных на юге и северо-западе до слабогидроморфных на севере и северо-востоке исследованного участка. Основу группировки земель по гидрологическому режиму составляют данные о морфологии почвенного профиля, глубине залегания морены и грунтовых вод, соответственно, а группировку земель на основе рельефа можно использовать как предварительную с обязательным ее дополнением почвенными гидрофизическими данными и расчетными процедурами.

**Ключевые слова:** движение влаги в почвенном покрове; гидрология почв; адаптивно-ландшафтное земледелие; SWAT.

## The water regime of the soil cover of the agricultural landscape and its components (using the example of the VNIMZ experimental field in the Tver region)

© 2026 A. G. Bolotov<sup>1</sup>, A. I. Kalnina<sup>1</sup>, E. V. Shein<sup>1,2,3\*</sup>,  
A. V. Dembovetskiy<sup>2</sup>, R. V. Kalinichenko<sup>1</sup>, P. P. Phil<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/0000-0002-0101-5293>, e-mail: [evgeny.shein@gmail.com](mailto:evgeny.shein@gmail.com).

<sup>2</sup>Lomonosov Moscow State University,  
1 Leninskie Gori, Moscow 119991, Russian Federation.

<sup>3</sup>Verkhnevolzhsky Federal Agrarian Scientific Center,  
3 Tsentralnaya Str., Novy village, Suzdal district,  
Vladimir region, 3601261, Russian Federation.

Received 12.05.2025, Revised 05.06.2025, Accepted 27.01.2026

**Abstract:** The classification of soils water regimes is a basic scientific fundament of an interdependent relationship between the movement of water and the formation of a soil profile. This kind of classification provides a scientific and methodological platform for studying both the water regimes of soils in the landscape and the distribution of soils in the soil cover of the landscape. Numerical methods for representing the hydrological regimes of soils in the agricultural landscape are based on physical mathematical models of the soil water movement and spatial GIS information, together allowing to calculate, analyze and predict the water regimes of soils in the agricultural landscape. A spatial-dynamic SWAT (Soil-Water-Atmosphere-Tool) model is presented to describe the water regimes of soils in the agro-landscape of the finite moraine ridge of the Upper Volga postglacial region (East European Plain, Tver region), as an example of landscape numerical hydrological models. Experimental data on long-term observations of soil moisture correspond to the water calculated by the SWAT model at different times at a certain depth of the soil profile.

**Keywords:** water regimes of soils, movement of moisture in the soil, modeling, spatial hydrodynamic modeling, adaptive landscape agriculture, SWAT.

### ВВЕДЕНИЕ

Интенсивно развивающаяся концепция землеустройства на

ландшафтно-экологической основе (Кирюшин, 1996; Кирюшин, 2010; Кирюшин, 2024), направленная на формирование устойчивых урожаев при управлении почвенными ресурсами, является важным направлением развития исследований почвенного покрова в агроландшафте. Одним из таких ресурсов почвенного покрова является водный режим не только агропроизводственного участка, но поля в целом, на котором агроэкологическими подходами требуется оценить и количественно прогнозировать водные режимы почв. Для такого рода анализа мозаики водных режимов почвенного покрова, их практической оценки для выращиваемых сельскохозяйственных культур требуется прежде всего агроэкологическая классификация водных режимов почв. При формирующемся агроэкологическом подходе известна подобная классификация. Ее автор, В.И. Кирюшин (Кирюшин, 2011), точно и определенно сформулировал требования к такого рода классификациям и исследованиям: это прежде всего масштаб агроэкологического ландшафта с характерными его подразделениями и особенностями при учете существующих в физике почв и агрофизике подходов к классификациям и оценке водных режимов почв, не теряющих связи с особенностями агроландшафта, его топографией и отвечающих задачам характеристики водного режима входящих в почвенный покров почв.

Прежде всего, это масштабная характеристика, определяющая зональные и агроландшафтные особенности с учетом пространственно неоднородных агроусловий. Данная необходимая черта анализа почвенного покрова, когда важно целенаправленно проанализировать водные ресурсы в ландшафте и представить водный режим почв как одну из характерных ландшафтных особенностей, определяющих в свою очередь влагообеспеченность растений. Распространены различные подходы к классификации водных режимов почв (табл. 1).

Первая и важнейшая задача в этом случае – выделить главенствующий фактор, определяющий водный режим в конкретном ландшафте, и ответить на соответствующий ключевой вопрос агропроизводства: когда, где и почему есть недостаток / избыток / оптимум влаги в корнеобитаемом слое для растений?

**Таблица 1.** Типы водного режима почв, их характеристики, классификации в целях научного обоснования методов и способов мелиорации

**Table 1.** Types of soil water regime, their characteristics, classifications for the purpose of scientific substantiation of methods and techniques of land reclamation

<b>Тип водного режима почв</b>	<b>Характеристика</b>	<b>Классификация (Роде, 1985; Зайдельман, 1996)</b>	<b>Другие классификации</b>
Автоморфные почвы	Наличие глубинного оттока влаги с нижней границы. Основное энерго- и массопоступление с верхней границы почвы.	Мерзлотный Промывной Периодически промывной Застойно-промывной Непромывной Выпотной Десуктивно-выпотной	Американская (по Glossary of Soil Science Terms. Soil Science Society of America, 1926.). Aridic – недостаток доступной воды в вегетационный период; период с доступной для растений водой при температура > 5 градусов более 90 дней. Torric – аналогичен aridic, но учитывает почвенный профиль (тип почвы, горизонты и гидрологические слои). Udic – засушливый. 90 дней после летнего солнцестояния и температура на 50 см менее 5 градусов. Ustic – полуаридный, периоды засухи с температурой < 5 градусов глубже 50 см. Xeric – средиземноморский, теплый, но увлажнение только в зимний период. Aquic – водонасыщенные почвы.

**Продолжение таблицы 1**  
**Table 1 continued**

<b>Тип водного режима почв</b>	<b>Характеристика</b>	<b>Классификация (Роде, 1985; Зайдельман, 1996)</b>	<b>Другие классификации</b>
Гидроморфные	Выделяются вследствие постоянного переувлажнения. В почвах выделяются водонасыщенные слои, анаэробные условия, наличие оглеения, глубина оглеения и почечного гумуса. Глубина залегания глеевого горизонта (пятен оглеения, новообразований) определяет классификационную принадлежность.	(Зайдельман, 1985; Зайдельман, 1996) Неоглеенные (глей глубже 150 см). Глубокооглеенные (глей с глубины 90 см). Слабооглеенные (глей с глубины 75 см). Глееватые (глей с глубины 60 см) – необходим дренаж. Глеевые (глей на 40 см).	(Кирюшин, 2010) Слабополугидроморфные. Полугидроморфные. Слабогидроморфные. Сильнополугидроморфно-литогенные. Гидроморфные. Литогенные.
Полугидроморфные	Почвы, в которых проявляется зональный тип при наличии гидроморфизма (например, черноземы оглеенные).	Анаэробизм вследствие периодического переувлажнения (Кирюшин, 2011).	

Конечно, основой такого выделения водных режимов является типизация агроландшафтов по их сложности, руководствуясь принципом “чем сложнее ландшафт, тем сильнее проявляется взаимосвязь его элементов через разного рода потоки, в том числе и водные, поверхностные и внутрипочвенные”. Безусловно, прежде всего указывается почвенно-климатическая зона расположения ландшафта, которую обычно выделяют по коэффициенту увлажнения (КУ). Так, например, выделяют избыточно влажную зону ( $KУ > 1.33$ ), влажную ( $1.33-1.0$ ), полувлажную ( $1.0-0.77$ ), полусухую ( $0.77-0.55$ ), засушливую ( $0.55-0.44$ ), очень засушливую ( $0.44-0.33$ ), полусухую ( $0.33-0.22$ ), сухую ( $0.22-0.12$ ), очень сухую ( $KУ < 0.12$ ) (Кирюшин, 2010; Шестаков, 2003; Зайдельман, 1985; Зайдельман, 1996).

Далее уже следуют агроэкологические группы земель, которые выделяются по ведущим факторам, обеспечивающим влагообеспеченность агроландшафта, – эрозия, переувлажнение, засоление почв и др. (Simsek et al., 2019). Так как в основном классификации агроландшафтов проводятся по сложности ландшафта, руководствуясь вышеуказанным принципом: “чем сложнее ландшафт, тем сильнее проявляется взаимосвязь его элементов через водные и другие потоки” (Кирюшин, 2010); его особенности и были положены в основу разделения почв по агроэкологическому принципу. Соответственно, В.И. Кирюшиным выделены: (1) плакорные земли; (2) эрозионные земли; (3) переувлажненные земли, которые разделяются в зависимости от гидрологического режима; (4) солонцовые и солонцово-солончаковые, земли овражно-балочного комплекса, литогенные, среди которых слабо-, средне-, сильно- и очень сильно эрозионные земли и (5) переувлажненные земли, которые разделяются в зависимости от гидрологического режима, степени экологического переувлажнения и, соответственно, характера их использования. По реакции растений и наличию мелиоративных мероприятий (дренаж, агротехнические и пр.) среди переувлажненных выделяют слабопереувлажненные, средне- и сильнопереувлажненные почвы. Отметим, что предложенная В.И. Кирюшиным классификация водных режимов агроландшафтов является во многом топографической с учетом рельефа в виде основного фактора, влияющего на водный режим почв

венного покрова. Не отрицая важного, формирующего составляющего водного режима – топографического фактора (Shein et al., 2021), при рассмотрении водных режимов почвенного покрова хотелось бы отразить и почвенные условия, прежде всего мощность почвенного профиля, его строение, глубину залегания подстилающей породы, уровень грунтовых вод, гранулометрический состав профиля, так как именно эти почвенные факторы во многом определяют распределение осадков, особенно в условиях близкого залегания подстилающих пород (морены, боковые и донные морены и пр.) (Belik et al., 2019; Belik et al., 2020; Yu et al., 2021). В связи с этим в данном исследовании основное внимание было сосредоточено на характеристике почвенно-физических свойств: залегания морены, надморенного суглинка, особенностях гранулометрического состава почвенных слоев в почвенном покрове Опытного поля института ВНИИМЗ (Тверская обл.). Цель исследования: разработать подходы к оценке водного режима различных участков почвенного покрова сельскохозяйственного поля. Задачи: (1) обоснование применения ландшафтной математической модели для выделения почв с различными водными режимами, (2) выделение ареалов по различной интенсивности взаимоперетока влаги и (3) обоснование основных почвенных факторов, определяющих водный режим почв и влагообеспеченность сельскохозяйственных растений в данном агроландшафте, являющихся основой для обоснования мелиоративно-агротехнических мероприятий.

При сравнении представленных в таблице 1 различных классификаций типов водного режима, становится ясно, что обоснование водных режимов в агроландшафте нуждается, прежде всего, в точных и долговременных наблюдениях за влажностью почвы и в получении ответов на вопросы: когда, в какой толще почвенная влажность приближается к полной влагоемкости (ПВ), к влажности менее влажности завядания (ВЗ) и диапазону доступной влаги. Величина ПВ указывает на наличие гидроморфизма и возможности образования глеевого горизонта, глубина залегания которого служит классификационным признаком (табл.1). Более того, в ряде научных подходов подчеркивается роль почвы, водопроницаемости ее слоев, глубины и расположения подстилающего

горизонта, формирующего нижнюю границу почвы и ряд других гидрофизических внутрипочвенных свойств и характеристик. Именно эти внутрипочвенные свойства, как правило, незаметные при рельефном исследовании, и определяют водорегулирующую роль почвы в пространстве агроландшафта (Зайдельман, 1985; Зайдельман, 1996). При мелиоративном обустройстве следует знать происхождение вод, вызывающих гидроморфизм, среди которых в самом общем виде выделяют атмосферные, грунтовые, грунтово-напорные, склоновые и намывные (пойменные). Следует отметить, что используемые ныне подходы, разработанные Ф.Р. Зайдельманом и В.И. Кирюшиным, для выделения гидроморфных почв, подлежащих технической мелиорации (дренажу) и особым агротехническим приемам в виде вспашки и систем севооборотов (посев разных по влагопотреблению растений и пр.), действительно и наиболее востребованы в настоящее время. В частности, гидроморфные почвы, относящиеся к неоглееным, глубокооглееным (глей с глубины 90 см и ниже) и слабооглееным (глей с глубины 75 см), при учете происхождения и глубины грунтовых вод (Зайдельман, 1996; Bouma et al., 1980; Bouma, 2006), вызывающих гидроморфизм, принципиально не нуждаются в технических мелиоративных мероприятиях, а вполне могут обходиться агротехническими и вегетационными (состав растений и пр.). В этом отношении особо важными становятся научное обоснование текущего водного режима почв, возможности цифрового регионального их выделения и научно обоснованного управления.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Для исследования гидрологического режима было выбрано опытное поле на территории ВНИИМЗ в г. Эммауссе. Объект находится в Калининском муниципальном округе в 4 км на юго-запад от г. Твери. С северной и северо-западной стороны опытное поле ограничивается Ленинградским шоссе (часть Федеральной трассы “Россия”), с юго-восточной стороны участок огражден поселениями “Губино” и “Прибытково”. Исследуемый участок находится в зоне умеренно-континентального климата со значениями гидротермического коэффициента в пределах от 1.4 до 1.8 (Мирзоев, Мирзоев, 1994). На территории опытного поля заложен гон-

чарный дренаж закрытого типа. Глубина закладки дрен составляет около 1 м. Междреннее расстояние составляет в среднем 30 м (Иванов и др., 2021). В данной статье, как характерный пример почв Нечерноземной зоны, в качестве объекта исследования рассматривается агродерново-подзолистая глееватая супесчаная почва на двучлене. Некоторые свойства этой почвы представлены в таблице 2, а также приведены в публикациях (Иванов и др., 1999; Иванов и др., 2021; Шеин и др., 2021). Отметим, что при морфологическом описании указанных почв были выделены следующие почвенные горизонты:

Р (0–21 см) – пахотный, гомогенный, опесчаненный суглинок, уплотнения плужной подошвы не наблюдается, хотя в нижней части слегка уплотнен.

ВТ (21–46 см) – светлый, опесчаненный, светлее предыдущего, палевый, отмытый.

ВТg (46–90 см) – признаки (пятна) красновато-бурые, пылеватый, в нижней части – моренные включения, камни, редкие светлые пятна оглеения; микроновообразования; железисто-марганцевые включения.

С (глубже 90 см) – тяжелосуглинистая, красновато-бурая морена со следами (светлыми и грязно-голубыми пятнами) оглеения, моренные включения, камни.

Экспериментальные исследования проводились в естественных условиях и на образцах различных горизонтов указанной выше почвы. Использовались традиционные методы морфологического описания и методы полевой физики почв (Шваров и др., 2012), а также лабораторные приборные методы дифрактометрии, седиментации (Дембовецкий и др., 2024). Для более подробного исследования водного режима в почвенном покрове участка были проведены исследования гранулометрического состава и отдельных элементов гидрологии (в частности, глубины грунтовых вод, их динамики в течение вегетационного сезона). В рамках данной статьи будут рассмотрены некоторые из точек наблюдения под соответствующими номерами (рис. 1). Выбор данных точек обусловлен их положением в ландшафте и наличием экспериментальных данных по измерениям уровня грунтовых вод.

**Таблица 2.** Некоторые физические и химические свойства агродерново-подзолистой глееватой легкосуглинистой (суглинок опесчаненный) почвы

**Table 2.** Some physical and chemical properties of agro-soddy-podzolic gleyic light loamy (sandy loam) soil

Горизонт, глубина, м	Глубина, см	Влажность гигроск., %	Влажность наименьшей влагоемк. (НВ), %	Плотность почвы, г/см <sup>3</sup>	Плотность твердой фазы, г/см <sup>3</sup>	Содержание углерода, %	*Содержание глины (<2 мкм), %	*Содержание песка (50–200 мкм), %
P	0–21	1.36	18.1	1.12	2.59	2.53	6.5	48.5
BT (21–46 см)	30–40	0.92	17.8	1.23	2.63	0.85	4.5	67.3
BT <sub>g</sub> (46–90 см)	70–80	0.96	24.3	1.42	2.69	0.52	5.5	56.4

**Примечание.** \* – приведены фракции гранулометрического состава, используемые в WRB.

**Note.** \* – particle size fractions used in WRB.

Для пространственного определения гидрологического режима использовалась модель SWAT на базе программы QGIS (версия 3.28) (Шеин, и др., 2023). Для моделирования были использованы несколько блоков данных: цифровая модель рельефа, почвенная карта, карта землепользования с сопутствующими таблицами значений, а также данные об осадках.

В данном исследовании в качестве исходной для пространственного разделения применялась классификация видов земель, основанная на агроэкологической оценке земель по В.И. Кирюшину (Кирюшин, 2011), использовались цифровые снимки рельефа поверхности, снимки малых летательных аппаратов и почвен-

ные описания (Лозбенев и др., 2024). Вид земель приурочен к одной почве на уровне разновидности (до грансостава), сходному составу пород (в данном случае – составу пахотного горизонта и глубине залегания морены) и расположен в пределах одного элемента мезоформы рельефа (верховья ложбин, моренный холм и др.). Основным фактором дифференциации почвенных условий в данной карте служит перенос воды по поверхности почвы и мощность песчаной толщи поверх морены. В легенде толщи песка поверх морены разделены на 3 вида: 1) морена залегает ближе 50 см от поверхности, 2) морена находится на глубине 50–100 см и 3) морена находится глубже 1 м от поверхности. Именно глубина залегания морены в данном случае является основным классификационным признаком выделения разных водных режимов почв в агроландшафте.

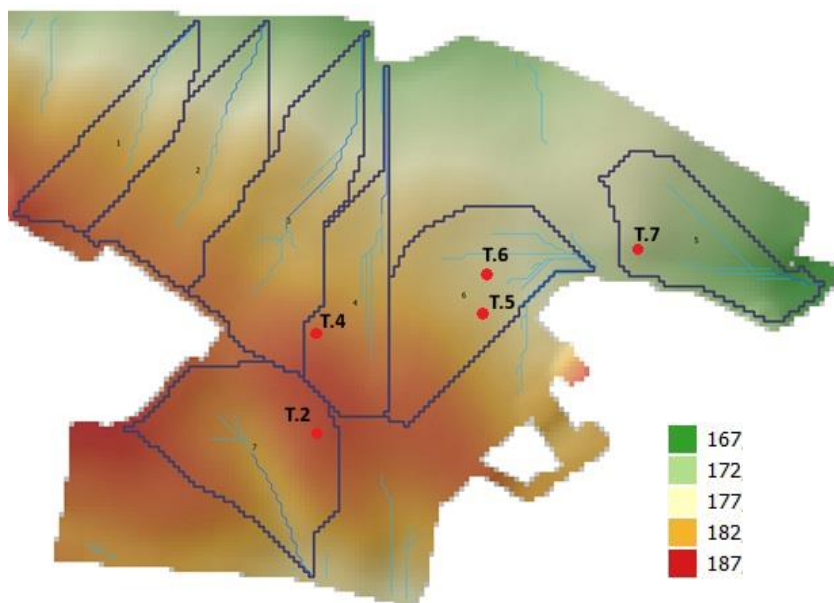
## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

При моделировании водного режима с помощью модели SWAT на опытном поле были выделены гидрологические участки (subbasins), каждый из которых состоит из верховья (водораздела), водосборной части, водотока и стока (рис. 1).

Определение границ гидрологических участков обуславливается размерами входящих в их состав ландшафтных единиц (“Landscape Units”, представляют собой однородные по рельефу территории с близкой динамикой влажности) и основано на законе гидрологии, который указывает, что анализ и управление водными ресурсами следует вести в масштабе водосбора, зная условия его формирования, условия накопления и расхода воды на выделенном участке. Всего на опытном поле было выделено 7 гидрологических участков, а водотоки отличаются разной интенсивностью (синие – более интенсивные, называемые потоками, “Streams”; голубые – менее интенсивные, берущие начало у источника влаги, в нашем случае – это атмосферные осадки).

С практической точки зрения объект исследования может быть разделен на участки, однородные по ландшафту и геоморфологии. В данном случае на основе программы SWAT участки опытного поля были разбиты на 7 гидрологических

субводосборов на основе рельефа, карты землепользования, карты почв и данных об осадках (рис. 1). Указанные свойства важны при масштабных построениях поверхностных водотоков и агропланировке. Данный подход должен обязательно учитывать особенности почвенно-физических свойств и режимов для определения способов и методов мелиоративного обустройства, в частности, агротехническими мероприятиями, направленными на улучшение физических свойств почвы, ее пахотного слоя, влагообеспеченности растений.



**Рис. 1.** Карта местности с выделенными по SWAT гидрологическими участками (subbasins) и почвенными водотоками. Номера почвенных разрезов отмечены красным цветом. Справа приведена высотная шкала (высота над уровнем моря в метрах).

**Fig. 1.** A map of the area with SWAT-delineated hydrological (subbasins) and soil watercourses. Soil section numbers are marked in red. The elevation scale (altitude in meters above sea level) is shown on the right.

Сравним выделенные гидрологические участки с картой агроэкологических видов земель (рис. 2). Данные карт хорошо согласуются. Выделенные водотоки находятся в пределах земель разной степени гидроморфности (от слабополугидроморфно-литогенных до слабогидроморфных по Кирюшину (Кирюшин, 2011)), за исключением гидрологического участка № 5, где интенсивный водоток (отмеченный синим цветом) проходит через литогенные земли, в то время как чуть западнее от него находятся гидроморфные участки.

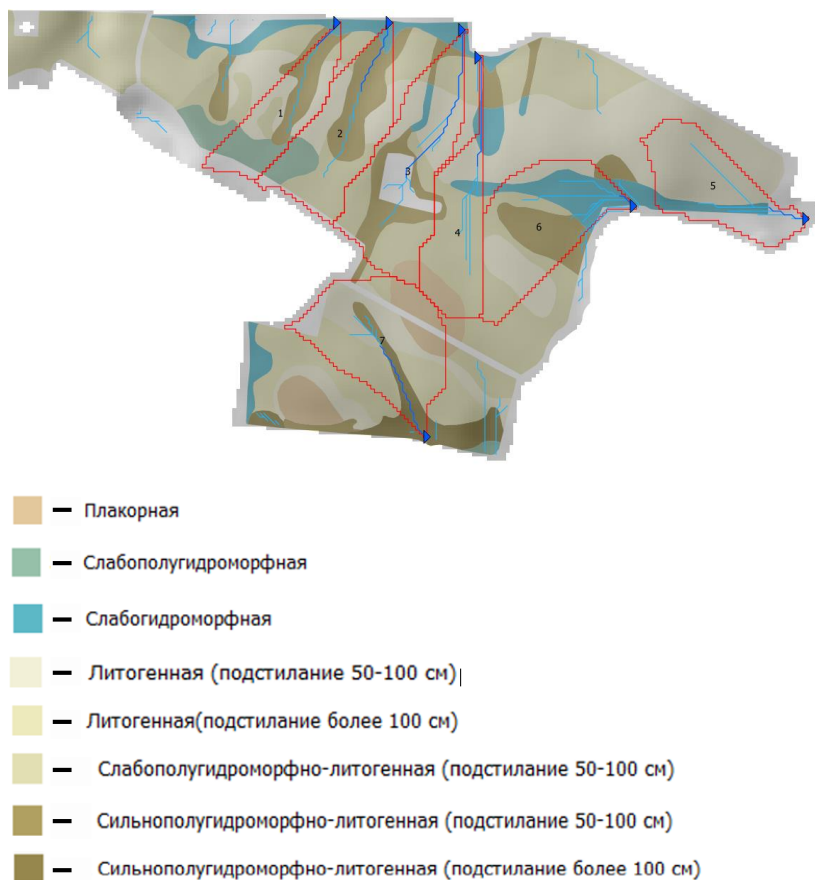
Указанное расхождение может быть следствием того, что SWAT при выделении водных потоков опирается больше на поверхностный рельеф, а при агроэкологической оценке главным фактором является расположение слабопроницаемого слоя (морены). На всех остальных гидрологических участках ясно видны места сбора атмосферных осадков и их транзит в понижения с нарастанием интенсивности потоков.

Рассмотрим также зоны формирования локального стока на основе топографических факторов. На рисунке 3 представлен пример моделирования по данным цифровой модели рельефа локальных микроводосборов на опытном поле. Топографический индекс влажности (TWI) служит индикатором перераспределения выпавших на поверхность почвы атмосферных осадков (или весеннего снеготаяния), которые формируют поверхностный и внутрипочвенный сток:

$$TWI = \ln\left(\frac{\alpha}{\tan\beta}\right),$$

где  $\alpha$  – удельная водосборная площадь,  $\beta$  – угол наклона.

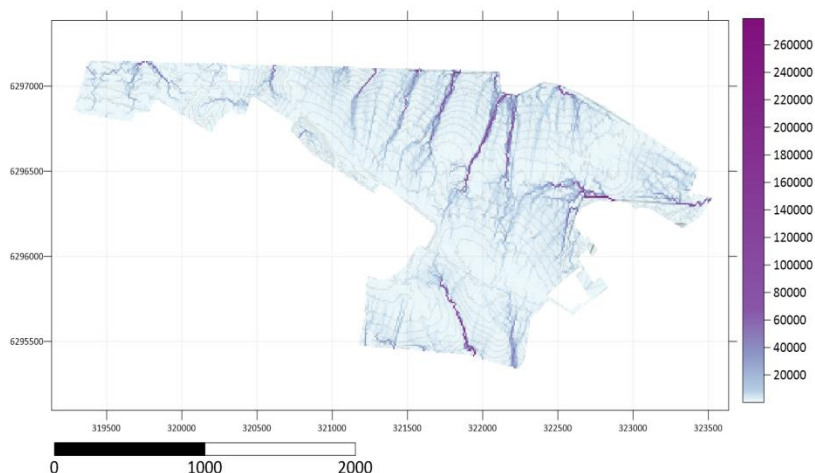
Отметим, что карты на рисунках 1 и 3 согласуются во многом, потому что опираются на цифровую модель рельефа. В местах аккумуляции влаги расположены гидроморфные разновидности земель (рис. 2). Заметим также, что карта гидрологических участков SWAT более широко показывает участки с возможным переувлажнением и переходные зоны от возвышенностей к низинам, что позволяет увидеть более полную картину складывающегося водного режима.



**Рис. 2.** Совмещенные карты гидрологических участков SWAT и агроэкологических видов земель (Лозбенев и др., 2024). Красным контуром выделены участки (subbasins), голубые и синие линии – водотоки разной степени интенсивности.

**Fig. 2.** Combined maps of SWAT hydrological areas and agroecological land types (Lozbenev et al., 2024). Subbasins are outlined in red, while light blue and blue lines represent streams of varying intensity.

Добавление почвенной гидрологической функции принципиально изменяет ситуацию в группировке. Учет сложной структуры почвенного покрова позволяет выйти за рамки положений группировки земель на основе топографических факторов.



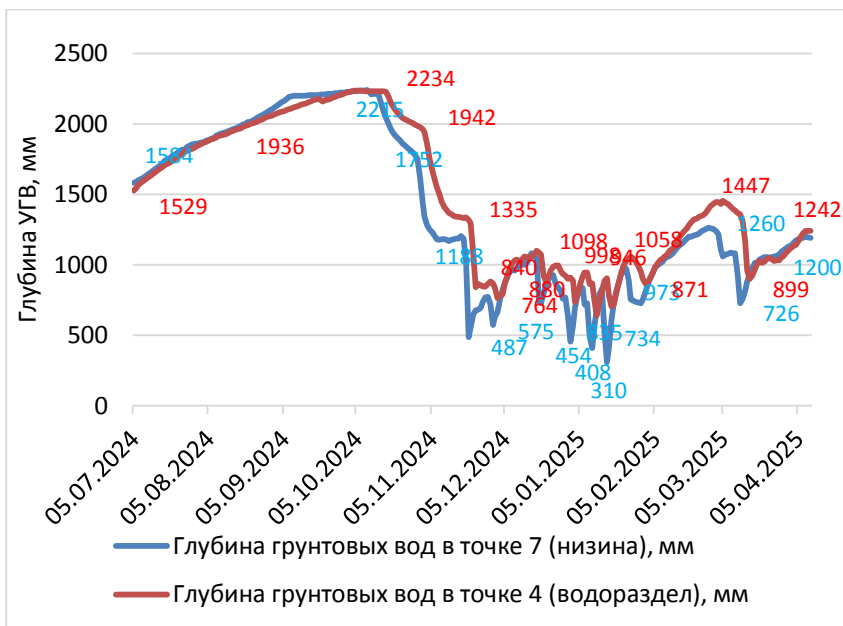
**Рис. 3.** Карта локальных микроводосборов и водотоков Опытного поля ВНИИМЗ на основе TWI.

**Fig. 3.** Map of local micro-catchments and watercourses of the VNIIMZ Experimental Field based on TWI.

Отметим различия в гидрологическом режиме выделенных участков путем сравнения уровня грунтовых вод, во многом определяющих влажность почв в точках 4 и 7, находящихся на различных гидрологических участках при разной динамике уровня грунтовых вод в холодный период года (рис. 4).

Обе точки наблюдений (т. 4 и т. 7), на водоразделе и в низинной части, имеют ярко выраженный сезонный ход уровня грунтовых вод, близкую динамику их уровня. Зимой для обеих точек характерны высокие значения влажности, и если в точке 4 можно говорить о превалирующей роли атмосферного питания

грунтовых вод в это время, то в понижении влага может накапливаться благодаря интенсивному внутрипочвенному и поверхностному стоку. Согласно карте SWAT (рис. 1) наибольшая часть данного стока исходит из гидрологического субводосбора № 6 (который можно назвать “транзитным”, куда в свою очередь попадает часть атмосферных осадков с вершины гидрологического субводосбора № 4 (“аккумулирующий”). Гидрологический субводосбор № 5 имеет наибольшую площадь в низине и выполняет функцию накопления влаги и ее сброса с территории опытного поля.



**Рис. 4.** Динамика УГВ на водоразделе (т. 4) и в низине (т. 7).

**Fig. 4.** Dynamics of groundwater level at the watershed (point 4) and in the lowland (point 7).

Также следует отметить, что на плакоре в грунтовом питании особую роль играет капиллярно-подвешенная влага в пахот-

ном горизонте, что важно с точки зрения влагообеспеченности посевов. В данном случае оподзоленный облегченный горизонт является слоем гидрологического разрыва вертикальных потоков капиллярной влаги. Познание причин и путей миграции влаги в пределах агроландшафта важно в задачах управления в земледелии. Например, применение агромелиоративных приемов разрушения плужной подошвы в транзитной зоне позволит уменьшить внутрипочвенный сток с плакорной части, и тем самым увеличить влагообеспеченность с/х культур за счет капиллярно-подвешенной влаги в пахотном горизонте. На данном примере показано, что группировку земель на основе топографических факторов можно использовать как предварительную, с обязательным дополнением почвенной гидрологической функцией. Показано, что на плакоре период увлажнения пахотного горизонта длиннее, чем в транзитной зоне. Кроме того, в точках 4 и 7 существенную роль играют формирующиеся преимущественные потоки. Эти сквозные линии тока обусловлены строением почвенного профиля, почвенной структурой, наличием макропор и трещин, имеющих большое гидрологическое значение и не проявляющихся при обследовании почвенного покрова с поверхности, при оценке особенностей только рельефа местности.

## ВЫВОДЫ

1. Для полного анализа распределения водных режимов в масштабе агроландшафта необходимо рассматривать формирующие водный режим почвенно-физические факторы: глубину почвенного слоя и уровень грунтовых вод, положение наименее водопроницаемого слоя (или подстилающей породы). Именно от этих почвенных факторов будет зависеть водный режим отдельных почв в почвенном покрове.

2 Почвенно-физическая агроландшафтная характеристика должна включать не только количественные описания поверхности почвенного покрова и свойства почвы, но и внутрипочвенный рельеф. Для случая опытного поля ВНИИМЗ показано, что необходимо учитывать глубину залегания морены, смены гранулометрического состава, плотности в почвенном профиле. При этом общее правило остается: “чем сложнее ландшафт, тем сильнее

проявляется связь его элементов”. Это правило справедливо и для внутрипочвенного рельефа, т. е. глубины залегания морены, почвенных слоев с разным гранулометрическим составом.

3. Для количественной оценки водных режимов почв в почвенном покрове агроландшафта необходимо использовать физически обоснованные математические пространственные модели (типа SWAT) с экспериментально полученными данными по почвенно-ландшафтному и агроклиматическому обеспечению.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дембовецкий А.В., Тюгай З.Н., Шеин Е.В. Гранулометрический состав почв: история, развитие методов, современное состояние и перспективы // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. 2024. Т. 79. № 4. С. 7–13. DOI: <https://doi.org/10.55959/MSU0137-0944-17-2024-79-4-00-00>.
2. Иванов Д.А., Корнеева Е.М., Салихов Р.А., Петрова Л.И., Пугачева Л.В., Рублюк М.В. Создание ландшафтного полигона нового поколения // Земледелие. 1999. № 6. С. 15–16.
3. Зайдельман Ф.Р. Гидрологический режим почв Нечерноземной зоны. Генетические, агрономические и мелиоративные аспекты. Л.: Гидрометеоиздат, 1985. 328 с.
4. Зайдельман Ф.Р. Мелиорация почв. М.: Изд-во МГУ, 1996. 382 с.
5. Кирюшин В.И. Агрономическое почвоведение. М.: КолосС, 2010. 687 с.
6. Кирюшин В.И. Классификация почв и агроэкологическая типология земель. СПб.: Лань, 2011. 288 с.
7. Кирюшин В.И. Концепция землеустройства на ландшафтно-экологической основе // Почвы – опора России: тезисы докл. IX съезда Общества почвоведов им. В.В. Докучаева. Москва, Казань, 2024. С. 885–887.
8. Кирюшин В.И. Теория адаптивно-ландшафтного земледелия и проектирования агроландшафтов. М.: КолосС, 2011. 443 с.
9. Кирюшин В.И. Экологические основы земледелия. М.: Колос, 1996. 366 с.
10. 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 дерново-подзолистых почвах, Тверская область // Почвоведение. 2024. № 12. С. 1705–1735.

11. *Мирзоев Е.С., Мирзоев А.Е.* Конаковский район: краеведческий справочник. Тверь, 1995. 331 с.
12. *Роде А.А.* Почвенная влага. М.: Изд-во АН СССР, 1952. 445 с.
13. Теории и методы физики почв / под ред. *Е.В. Шеина, Л.О. Карпачевского*. М.: Гриф и К, 2007. 616 с.
14. *Шваров А.П., Смагин А.В., Дембовецкий А.В., Умарова А.Б., Поздняков А.И., Фаустова Е.В.* Полевые методы определения физических свойств и режимов торфяных и минеральных почв: учебное пособие к полевой практике для студентов, обучающихся по направлению подготовки 021900 Почвоведение / под ред. *Е.В. Шеина*. М.: Гриф и К, 2012. 140 с.
15. *Шейн Е.В., Болотов А.Г., Дембовецкий А.В., Усенко Д.Ю., Хархардинов Н.А., Вернюк Ю.И.* Использование модели SWAT для характеристики водного режима почв агроландшафта // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2023. Вып. 117. С. 5–22. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2023-117-5-22>.
16. *Шейн Е.В., Иванов Д.А., Болотов А.Г., Дембовецкий А.В.* Гранулометрический состав почв конечно-моренной гряды Верхневолжского постледникового района (Восточно-Европейская равнина, Тверская область) // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2022. № 110. С. 5–21. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2022-110-5-21>.
17. *Шестаков В.М., Поздняков С.П.* Геогидрология. М.: ИКЦ “Академкнига”, 2003. 176 с.
18. *Belik A.A., Bolotov A.G., Shein E.V.* Application of neural network pedotransfer functions to calculate soil water retention curve // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 368. 012008. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/368/1/012008>.
19. *Belik A.A., Kokoreva A.A., Bolotov A.G.* Characterizing macropore structure of agrosoddy-podzolic soil using computed tomography // Open Agriculture. 2020. Vol. 5. No. 1. P. 888–897.
20. *Bouma J.* Hydropedology as a powerful tool for environmental policy research // Geoderma. 2006. Vol. 131. P. 275–280.
21. *Bouma J., Dekker L.W., Haans J.C.F.M.* Measurement of depth to water table in a heavy clay soil // Soil Science. 1980. Vol. 130. P. 264–270.
22. *Dutta S., Sen D.* Application of SWAT model for predicting soil erosion and sediment yield // Sustainable Water Resources Management. 2018. Vol. 4. No. 3.
23. Glossary of Soil Science Terms. Soil Science Society of America. Madison, 1926. 154 p.

24. Shein Y.V., Bolotov A.G., Dembovetskii A.V. Soil hydrology of agricultural landscapes: quantitative description, research methods, and availability of soil water // Eurasian Soil Science. 2021. Vol. 54. No. 9. P. 1367–1374.
25. Simsek U., Shein E.V., Mikailsoy F., Bolotov A.G., Erdel E. Subsoil compaction: the intensity of manifestation in silty clayey Calcic Pantofluvic Fluvisols of the Iğdır region (Eastern Turkey) // Eurasian Soil Science. 2019. Vol. 52. P. 296–299. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229319030104>.
26. Yu D., Zha Y., Shi L., Bolotov A., Tso C.-H.M. Spatiotemporal sampling strategy for characterization of hydraulic properties in heterogeneous soils // Stochastic Environmental Research and Risk Assessment. 2021. Vol. 35. No. 3. P. 737–757.

## REFERENCES

1. Dembovetskiy A.V., Tyugay Z.N., Shein E.V., Granulometricheskii sostav pochv: istoriya, razvitiye metodov, sovremennoye sostoyanie i perspektivy (Granulometric composition of soils: history, development of methods, current status, and prospects), *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 17: Pochvovedeniye*, 2024, Vol. 79, No. 4, pp. 7–13, DOI: <https://doi.org/10.55959/MSU0137-0944-17-2024-79-4-00-00>.
2. Ivanov D.A., Korneeva E.M., Salikhov R.A., Petrova L.I., Pugacheva L.V., Rubluk M.V., Sozdaniye landshaftnogo poligona novogo pokoleniya (Creation of a new-generation landscape polygon), *Zemledeliye*, 1999, No. 6, pp. 15–16.
3. Zaydelman F.R., *Gidrologicheskiy rezhim pochv Nechernozemnoy zony. Geneticheskiye, agronomicheskiye i meliorativnyye aspekty* (Hydrological regime of soils in the Non-Black Earth zone: genetic, agronomic, and ameliorative aspects), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1985, 328 p.
4. Zaydelman F.R., *Melioratsiya pochv* (Soil reclamation), Moscow: Izd-vo MSU, 1996, 382 p.
5. Kiryushin V.I., *Agronomicheskoe pochvovedeniye* (Agronomic Soil Science), Moscow: KolosS, 2010, 687 p.
6. Kiryushin V.I., *Klassifikatsiya pochv i agroekologicheskaya tipologiya zemel* (Soil classification and agro-ecological land typology), St. Petersburg: Lan', 2011, 288 p.
7. Kiryushin V.I., Kontseptsiya zemleupravleniya na landshaftno-ekologicheskoy osnove, In: *Pochvy – opora Rossii: tezisy dokl. IX s'yezda Obshchestva pochvovedov im. V.V. Dokuchayeva*. (The concept of land management based on landscape-ecological principles, In: Soils – the foundation of Russia: abstracts of reports at the IX Congress of the Society of

Soil Scientists named after V.V. Dokuchayev), Moscow, Kazan, 2024, pp. 885–887.

8. Kiryushin V.I., *Teoriya adaptivno-landshaftnogo zemledeliya i proyektirovaniya agrolandshaftov* (The theory of adaptive landscape agriculture and the design of agro-landscapes), Moscow: KolosS, 2011, 443 p.

9. Kiryushin V.I., *Ekologicheskiye osnovy zemledeliya* (Ecological foundations of agriculture), Moscow: Kolos, 1996, 366 p.

10. Lozbenyov N.I., Kozlov D.N., Fil P.P., Khitrov N.B., Shilov P.M., Otsenka vliyaniya vida ugod'ya i pochvoobrazuyushchikh porod na sodержanie i zapasy organicheskogo ugleroda v meliorirovannykh dervno-podzolistykh pochvakh, Tverskaya oblast' (Assessment of the influence of land type and parent material on the content and reserves of organic carbon in ameliorated sod-podzolic soils in the Tver region), *Pochovedeniye*, 2024, No. 12, pp. 1705–1735.

11. Mirzoev E.S., Mirzoev A.E., *Konakovskiy rayon: kraevedcheskiy spravochnik. Tver'* (Konakovsky District: local history reference book), Tver, 1995, 331 p.

12. Rode A.A., *Pochvnaya vlaga* (Soil moisture), Moscow: Izd-vo AN SSSR, 1952, 445 p.

13. Shein E.V., Karpachevskiy L.O. (Eds), *Teorii i metody fiziki pochv* (Theories and methods of soil physics), Moscow: Grif i K, 2007, 616 p.

14. Shvarov A.P., Smagin A.V., Dembovetskiy A.V., Umarova A.B., Pozdnyakov A.I., Faustova E.V., *Polevye metody opredeleniya fizicheskikh svoystv i rezhimov torfyanykh i mineral'nykh pochv*, E.V. Shein (Ed.) (Field methods for determining the physical properties and regimes of peat and mineral soils), Moscow: Grif i K, 2012, 140 p.

15. Shein E.V., Bolotov A.G., Dembovetskiy A.V., Usenko D.Yu., Kharkhardinov N.A., Vernyuk Yu.I., Using the SWAT model to characterise the water regime of soils in agrolandscapes, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2023, Vol. 117, pp. 5–22, DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2023-117-5-22>.

16. Shein E.V., Ivanov D.A., Bolotov A.G., Dembovetskiy A.V., Granulometric composition of the finite moraine ridge soils of the Upper Volga postglacial region (East European plain, Tver region), *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2022, Vol. 110, pp. 5–21, DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2022-110-5-21>.

17. Shestakov V.M., Pozdnyakov S.P., *Geogidrologiya* (Geohydrology), Moscow: IKTs “Akademkniga”, 2003. 176 p.

18. Belik A.A., Bolotov A.G., Shein E.V., Application of neural network pedotransfer functions to calculate soil water retention curve, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, Vol. 368, 012008, DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/368/1/012008>.

19. Belik A.A., Kokoreva A.A., Bolotov A.G., Characterizing macropore structure of agrosoddy-podzolic soil using computed tomography, *Open Agriculture*, 2020, Vol. 5, No. 1, pp. 888–897.
20. Bouma J., Hydropedology as a powerful tool for environmental policy research, *Geoderma*, 2006, Vol. 131, pp. 275–280.
21. Bouma J., Dekker L.W., Haans J.C.F.M., Measurement of depth to water table in a heavy clay soil, *Soil Science*, 1980, Vol. 130, pp. 264–270.
22. Dutta S., Sen D., Application of SWAT model for predicting soil erosion and sediment yield, *Sustainable Water Resources Management*, 2018, Vol. 4, No. 3.
23. *Glossary of Soil Science Terms*. Soil Science Society of America, Madison, 1926, 154 p.
24. Shein Y.V., Bolotov A.G., Dembovetskii A.V., Soil hydrology of agricultural landscapes: quantitative description, research methods, and availability of soil water, *Eurasian Soil Science*, 2021, Vol. 54, No. 9, pp. 1367–1374.
25. Simsek U., Shein E.V., Mikailsoy F., Bolotov A.G., Erdel E., Subsoil compaction: the intensity of manifestation in silty clayey Calcic Pantofluvic Fluvisols of the Iğdır region (Eastern Turkey), *Eurasian Soil Science*, 2019, Vol. 52, pp. 296–299, DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229319030104>.
26. Yu D., Zha Y., Shi L., Bolotov A., Tso C.-H.M., Spatiotemporal sampling strategy for characterization of hydraulic properties in heterogeneous soils, *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2021, Vol. 35, No. 3, pp. 737–757.

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2026-127-62-71



**Cite this article as:**

Lal R., Soil and anthropogenic climate change, Dokuchaev Soil Bulletin, 2026, V. 127, pp. 62-71, DOI: 10.19047/0136-1694-2026-127-62-71

**Ссылки для цитирования:**

Lal R. Почвы и антропогенное изменение климата // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2026. Вып. 127. С. 62-71. DOI: 10.19047/0136-1694-2026-127-62-71

## Soil and anthropogenic climate change

© 2026 Rattan Lal

*CFAES Rattan Lal Center for Carbon Management and Sequestration,  
The Ohio State University, Columbus, Ohio, 43210, USA,  
<https://orcid.org/0000-0002-9016-2972>.*

*Received 11.01.2026, Revised 12.01.2026, Accepted 27.01.2026*

**Abstract:** Among global issues of the 21<sup>st</sup> century are: 1) anthropogenic climate change, 2) under- and mal-nourishment, 3) water scarcity and eutrophication, 4) dwindling biodiversity, 5) soil degradation and desertification, etc. Most of these and other issues are caused and exacerbated by land misuse, and inappropriate practices of soil/crop/water mismanagement. Thus, agriculture must be transformed to be a part of the solution by producing more from less, reducing losses, and increasing use efficiency of inputs. Soil is the largest reservoir of C stock in the terrestrial biosphere and contains 2400 PgC to 1-m depth compared with 850 PgC in the atmosphere and 620 PgC in trees and woody perennials. Soils and ecosystems have been the source of greenhouse gases (GHGs) since the onset of agriculture because of deforestation, biomass burning, draining of wetlands, soil degradation, and inputs of agro-chemicals and energy-based inputs. Soils of agro-ecosystems can be transformed from a source to a sink of atmospheric CO<sub>2</sub> by adoption of site-specific proven and best management practices. Upscaling C-farming can address food and nutritional security and advance Sustainable Development Goals of the United Nations.

**Keywords:** soil organic carbon; soil degradation; biodiversity; C-farming; sustainable development.

## Почвы и антропогенное изменение климата

**Резюме:** К глобальным проблемам XXI в. относятся: 1) антропогенное изменение климата, 2) недостаток и истощение запасов питательных веществ, 3) нехватка воды и эвтрофикация, 4) сокращение биоразнообразия, 5) деградация почв и опустынивание и т. д. Большинство этих и других проблем вызваны и усугубляются нерациональным использованием земель и некорректными методами управления почвенными и водными ресурсами, и выращивания сельскохозяйственных культур. Таким образом, сельское хозяйство должно быть преобразовано, чтобы способствовать решению проблемы, обеспечивая большие объемы производства с привлечением меньшего количества ресурсов, сокращая их потери и повышая эффективность использования. Почва является крупнейшим резервуаром углерода в наземной биосфере и содержит 2 400 млрд т С (Pg C) в метровом слое, в то время как его содержание в атмосфере составляет 850 млрд т, а в деревьях и древесных многолетниках – 620 млрд т. Почвы и экосистемы являются источником парниковых газов с момента зарождения сельского хозяйства из-за вырубki лесов, сжигания биомассы, осушения болот, деградации почв, а также применения агрохимикатов и энергоносителей. Почвы агроэкосистем могут быть преобразованы из источника в поглотитель атмосферного CO<sub>2</sub> путем внедрения проверенных и оптимальных методов управления, адаптированных под конкретные территории. Развитие углеродного земледелия может решить проблемы продовольственной и алиментарной безопасности и способствовать достижению целей устойчивого развития Организации Объединенных Наций.

**Ключевые слова:** органический углерод почвы; деградация почвы; биоразнообразие; углеродное земледелие; устойчивое развитие.

### INTRODUCTION

World soils contain about 2400 PgC to 1-m depth, comprising of soil organic C (SOC) of 1550 PgC and soil inorganic C (SIC) of ~850 PgC. Whereas SOC stock is more in soils of humid regions, SIC stock is more in soils of arid and semi-arid regions. Soils of agro-ecosystems have lost 25 to 75% of their original SOC stock because of plowing, drainage of wetlands, arable farming, and grazing of livestock. Estimates of historic C loss from soil vary widely but may range from 78 PgC to 135 PgC (Lal, 2018). Soil C loss is aggravated by degradation processes including accelerated erosion by water and wind,

salinization, decomposition, leaching, and elemental imbalance. Because of the historic C loss, soils of the agro-ecosystems and other managed land uses are depleted of their soil C stock. Thus, these depleted and degraded soils have a C sink capacity that can be harnessed by adopting practices which create a positive soil C budget. Similarly to sequestration of SOC, SIC can also be sequestered by formation of secondary carbonates and leaching of biocarbonates. Thus, the objective of this article is to deliberate land use and soil / crop / water management practices which increase productivity and lead to sequestration of SOC and SIC in soil.

### SOIL CARBON DYNAMICS

Soil, a living body and a highly dynamic entity, has the largest terrestrial biodiversity. As a living entity, soil health and its management leads to provisioning of several ecosystem services (i. e., food, feed, fuel, water quality and renewability, source of biodiversity, gaseous exchange, moderation of climate). However, heart of soil health is its soil C stock – specifically the SOC stock. The SOC stock has several fractions comprising of labile or reactive, intermediate or moderate labile, and passive fraction with a long mean residence time (MRT). The labile fraction is prone to mineralization and makes soil a source of CO<sub>2</sub> under aerobic conditions and CH<sub>4</sub> under anaerobic conditions. Transformation of soil N pool by nitrification / de-nitrification leads to emission of N<sub>2</sub>O especially in soil receiving input of nitrogenous amendments as compost / manure / cover crop or by use of chemical fertilizers. In comparison with CO<sub>2</sub>, the global warming potential (GWP) 25–28 for CH<sub>4</sub> and 265 for N<sub>2</sub>O (IPCC, 2024). Gaseous emission is caused by plowing, biomass burning, soil drainage, input of fertilizers and manure, intensive grazing, etc.

### GLOBAL WARMING EFFECTS ON INCREASED MINERALIZATION OF SOIL CARBON STOCK

The current and projected global warming is likely to have strong effects on natural and managed ecosystems. The soil C stock, both SOC and SIC but especially SOC, is vulnerable to increase in rate of mineralization of SOM. Impact of increase in temperature or miner-

alization is often described by the  $Q_{10}$  factor (rate of increase for a 10 °C increase) which may range from 2–18. The rate of increase also depends on soil properties and its environment such as soil type, landscape, slope direction (north facing vs. south facing), quality of SOM, microbial community, and the current temperature and moisture regimes ((Dai et al., 2017; Leirós et al., 1999; Ren et al., 2023). In general, it is widely believed that 1 °C increase in temperature may cause a loss of over 10% in SOM stock in temperate climates and about 3% in tropical eco-regions.

Changes in temperature and moisture regimes can also lead to drought and thus shift in flora and fauna. For example, the new record of drought and warmth in the Amazon in 2023 was attributed to regional and global climatic features (Espinoza et al., 2024). Increase in dry season length and temperature extremes over Brazil have caused savannization of Amazon due to climate change (Bottino et al., 2024). The impact on agro-ecosystems is leading to change in agronomic yield and total agricultural production: some negative and some positive (Yuan et al., 2024). These changes are attributed to alterations in use efficiency of inputs (e. g., fertilizers, irrigation) which can decrease with increase in temperature. Indeed, plant growth and its physiological functions are being strongly affected by the challenges of global warming, and this effect necessitates identification of strategies to adapt to anthropogenic climate change (Seth, Sebastian, 2024). Short and long-term warming events affect photosynthesis and thus growth and yield of crops (Bemacchi et al., 2023) and also the nutritional quality of food. Thus, global warming may have severe adverse effects of food and nutrition security and thus on human health and wellbeing. Based on a study in China, Lee et al. (2024) outlined the pathways by which climate change is and will affect food security in China. Food security, water scarcity, droughts and degradation of overall environment are a major threat to world peace and stability. Food security can also be jeopardized by an animal crisis caused by pollution, deforestation and global warming (Kaiho, 2023). Thus, there is a strong need to develop a coordinated and long-term strategy for adaptation and mitigation of climate change.

Soil degradation and global warming are mutually-reinforcing processes. Over and above the known processes of soil degradation

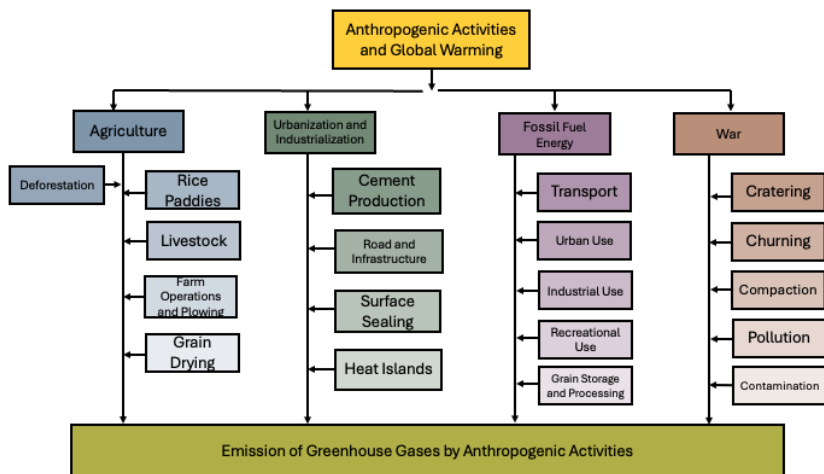
(physical, chemical, biological), modern warfare is a major factor of degradation by cratering, compaction, churning, contamination, pollution and other degradative processes whose adverse effects can persist for generations. Indeed, war destroys nature. Some anthropogenic activities which lead to emission of GHGs are outlined in Figure 1 and Table 1.

**Table 1.** Some examples of gaseous emission from anthropogenic activities

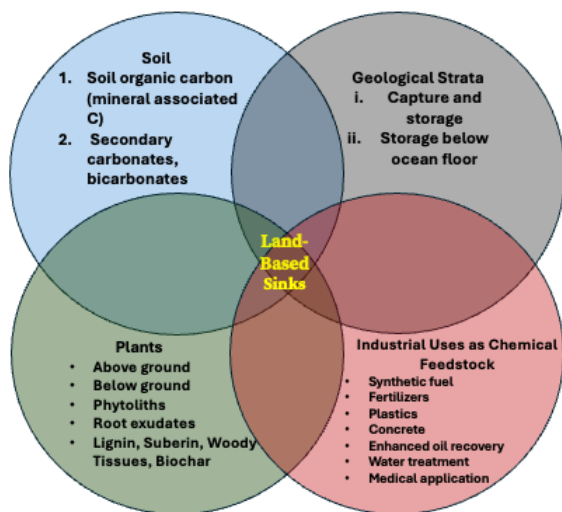
Strategy	Action	Reference
Methane	i) Rice paddies ii) Livestock	Sahil et al. (2024); Chatterjee et al. (2025) Kaiho et al. (2023); Sejian et al. (2017)
Nitrous Oxide	i) Fertilizer ii) Biomass burning	Ussiri and Lal (2013) Lal (1984)
Carbon Dioxide	Farm operations Fossil fuel combustion	Ussiri and Lal (2017) Abram et al. (2025)

Carbon sequestration in soil (both SIC and SOC) depend on transfer of plant-biomass to form humus and secondary carbonates. Capture and injection of CO<sub>2</sub> into stable rock strata or at the ocean floor is called geo-engineering (Massarveh et al., 2024). Atmospheric CO<sub>2</sub> can also be used as the feed stock for industrial uses and manufacture of numerous goods including synthetic fuel, plastic and cement (Fig. 2).

Carbon sequestration as secondary carbonates is sequestration of SIC (Du et al., 2024). Adoption of conservation agriculture is an important strategy especially when used in conjunction with residue mulch and cover cropping (Lorenzetti, Fionini, 2024).



**Fig. 1.** Some anthropogenic activities which lead to emission of greenhouse gases leading to global warming.



**Fig. 2.** Some examples of technological innovations of C capture and sequestration.

## MITIGATIVE STRATEGIES OF ANTHROPOGENIC CLIMATE CHANGE

The Paris Accord of 2015, AAA initiative of 2016, and many others have focused on policy and strategy to limit global warming. Achieving carbon neutrality by 2050 for each country is being deliberated, but not yet implemented. Adoption of bio-energy along with carbon capture and deep storage in stable geologic strata is an option to meet the carbon neutrality target. Rather than an individual country, Zhou et al. (2024) emphasized the importance of a global system of C neutrality for climate mitigation.

The C neutrality pledge (Paris Accord 2015) is a pertinent strategy to limit global warming to 2 °C. For example, China's C neutrality can individually mitigate global warming by 0.48 °C and 0.40 °C which account for 14% and 9% of the global warming over long-term under the shared socioeconomic pathway (Longhui et al., 2021). Also in China, Lu et al. (2023) documented that combining ambitious regional action (China's 2060 net zero goal) with global CO<sub>2</sub> removal may be a critical pathway to limit global warming to below 2 °C.

## CARBON SEQUESTRATION IN TERRESTRIAL ECOSYSTEMS AND CARBON FARMING

Transfer of atmospheric CO<sub>2</sub> into land-based sinks where it can stay for a long time without escape into the atmosphere is called "carbon sequestration". Some processes of C sequestration in land-based sinks are listed in Figure 2. Sequestration of C in soils of agroecosystems can be facilitated by Carbon Farming. This approach implies growing carbon in land as a commodity (or a crop) which can create another income stream for farmers. Trading of C credits is an option when the market is developed and appropriate protocol created. In the meantime, however, land managers can be rewarded as payments for ecosystem services @ US \$50 per of CO<sub>2</sub>eq which is the social value of soil carbon. The payment for ecosystem services can be facilitated by enacting Soil Health Act at state, national and international level.

## CONCLUSION

Anthropogenic climate change is a global issue. It is caused by

emissions from fossil fuel, deforestation, and agricultural activities such as plowing, in-field burning of biomass and use of fertilizers and other chemicals. Soils of agroecosystems are depleted of their C stock and thus have a carbon sink capacity. Sequestration of atmospheric CO<sub>2</sub> in soil involves that of soil organic carbon as humus and soil inorganic carbon as secondary carbonates. The process of soil carbon sequestration can be facilitated by adoption of site-specific best management practices, also called as carbon farming. Farmers and land managers should be rewarded for carbon sequestration according to the social value of carbon which can be as much as US\$50 per Credit of CO<sub>2</sub>eq. Transforming agriculture from a problem to be the part of a solution for improving the environment and adaptation / mitigation of climate change can be accomplished by enacting Soil Health Act at state, national and international level.

## REFERENCES

1. Abram N.J., Maher N., Perkins-Kirkpatrick S., Falster G.M., Hughes T.P., Meissner K.J., Slater L.J., King A.D., Pitman A.J., Moon G., Morgan W., Quantifying the regional to global climate impacts of individual fossil fuel projects to inform decision-making, *Npj Climate Action*, 2025, Vol. 4 (1), 92, DOI: <https://doi.org/10.1038/s44168-025-00296-5>.
2. Bernacchi C.J., Ruiz-Vera U.M., Siebers M.H., DeLucia N.J., Ort D.R., Short- and long-term warming events on photosynthetic physiology, growth, and yields of field grown crops, *Biochemical Journal*, 2023, Vol. 480 (13), pp. 999–1014, DOI: <https://doi.org/10.1042/BCJ20220433>.
3. Bottino M.J., Nobre P., Giarolla E., da Silva Junior M.B., Capistrano V.B., Malagutti M., Tamaoki J.N., de Oliveira B.F.A., Nobre C.A., Amazon savannization and climate change are projected to increase dry season length and temperature extremes over Brazil, *Scientific Reports*, 2024, Vol. 14 (1), 5131, DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-55176-5>.
4. Chatterjee I., Chakraborty S., Ray M., Ghosh R., Chanda M.R., Goswami A., Sil M., Polikarpov I., Novel avenues of mitigation of rice paddy methane: A review, *Journal of Crop Science and Biotechnology*, 2025, Vol. 28 (3), pp. 321–334, DOI: <https://doi.org/10.1007/s12892-025-00290-7>.
5. Dai S.S., Li L.J., Ye R., Zhu-Barker X., Horwath W.R., The temperature sensitivity of organic carbon mineralization is affected by exogenous carbon inputs and soil organic carbon content, *European journal of soil biology*, 2017, Vol. 81, pp. 69–75.
6. Du C., Bai X., Li Y., Tan Q., Zhao C., Luo G., Wu L., Chen F., Li C.,

Ran C., Zhang S., Xiong L., Song F., Xiao B., Li Z., Xue Y., Long M., Luo Q., Zhang X., ... Yang S., Storage, form, and influencing factors of karst inorganic carbon in a carbonate area in China, *Science China Earth Sciences*, 2024, Vol. 67 (3), pp. 725–739, DOI: <https://doi.org/10.1007/s11430-023-1249-9>.

7. Espinoza J.-C., Jimenez J.C., Marengo J.A., Schongart J., Ronchail J., Lavado-Casimiro W., Ribeiro J.V.M., The new record of drought and warmth in the Amazon in 2023 related to regional and global climatic features. *Scientific Reports*, 2024, Vol. 14 (1), 8107, DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-58782-5>.

8. Ghuman B.S., Lal R., Soil temperature effects of biomass burning in windrows after clearing a tropical rainforest, *Field Crops Research*, 1989, Vol. 22 (1), pp. 1–10, DOI: [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(89\)90083-X](https://doi.org/10.1016/0378-4290(89)90083-X).

9. IPCC, Special Report on Climate Change and Cities Seventh Assessment Report. UNEP/WMO/FAO/UNESCO, Geneva, 2026, DOI: <https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar7/>.

10. Kaiho K., An animal crisis caused by pollution, deforestation, and warming in the late 21<sup>st</sup> century and exacerbation by nuclear war, *Heliyon*, 2023, Vol. 9 (4), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e15221>.

11. Lal R., Digging deeper: A holistic perspective of factors affecting soil organic carbon sequestration in agroecosystems, *Global change biology*, 2018, Vol. 24 (8), pp. 3285–3301, DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.14054>.

12. Lee C.-C., Zeng M., Luo K., How does climate change affect food security? Evidence from China, *Environmental Impact Assessment Review*, 2024, Vol. 104, 107324, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2023.107324>.

13. Leirós M.C., Trasar-Cepeda C., Seoane S., Gil-Sotres F., Dependence of mineralization of soil organic matter on temperature and moisture, *Soil Biology and Biochemistry*, 1999, Vol. 31 (3), pp. 327–335, DOI: [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(98\)00129-1](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(98)00129-1).

14. Li L., Zhang Y., Zhou T. et al., Mitigation of China's carbon neutrality to global warming, *Nat Commun*, 2022, Vol. 13, 5315, DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-022-33047-9>.

15. Lorenzetti L.A., Fiorini A., Conservation Agriculture Impacts on Economic Profitability and Environmental Performance of Agroecosystems, *Environmental Management*, 2024, Vol. 73, pp. 532–545, DOI: <https://doi.org/10.1007/s00267-023-01874-1>.

16. Lu Y., Jin L., Zhong J., Zhang X., Zhang Y., Wu F., Zhang F., Wang Z., Zhang J., Xin X., Wu T., Wang D., Zhang D., Wang T., Hua W., Earth system responses under a global 2 °C-target scenario aligned with China's carbon neutrality pledge, *Environmental Research Letters*, 2025, Vol. 20 (10), 104049, DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/adfbfb>.

17. Massarweh O., Abushaikha A.S., CO<sub>2</sub> sequestration in subsurface geological formations: A review of trapping mechanisms and monitoring techniques, *Earth-Science Reviews*, 2024, Vol. 253, 104793, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2024.104793>.
18. Ren H., Xu S., Zhang F., Sun M., Zhang R., Cultivation and Nitrogen Management Practices Effect on Soil Carbon Fractions, Greenhouse Gas Emissions, and Maize Production under Dry-Land Farming System, *Land*, 2023, Vol. 12 (7), 1306, DOI: <https://doi.org/10.3390/land12071306>.
19. Sahil F.M., Narayanan M., Ilampooranan I., Setting Up Methane Mitigation Measures for Indian Rice Fields: Representative Emissions and New Interpretations, *Global Biogeochemical Cycles*, 2024, Vol. 38 (11), e2024GB008107, DOI: <https://doi.org/10.1029/2024GB008107>.
20. Sejian V., Bhatta R., Gaughan J., Malik P.K., Naqvi S.M.K., Lal R. (Eds.), *Sheep production adapting to climate change*, pp. 1–29, Singapore: Springer Singapore, 2017.
21. Seth P., Sebastian J., Plants and global warming: challenges and strategies for a warming world, *Plant Cell Rep.*, 2024, Vol. 43, 27, DOI: <https://doi.org/10.1007/s00299-023-03083-w>.
22. Ussiri D., Lal R., *Soil emission of nitrous oxide and its mitigation*, Springer Science & Business Media, Springer Verlag, Holland, 2012, 395 p.
23. Ussiri D.A., Lal R., *Carbon sequestration for climate change mitigation and adaptation*, Cham: Springer International Publishing, 2017, pp. 287–325.
24. Xu H., Huang L., Wang S., Effects of Warming on Change Rate of Soil Organic Carbon Content in Forest Soils, *Forests*, 2025, Vol. 16 (1), 59, DOI: <https://doi.org/10.3390/f16010059>.
25. Xu H., Wang M., You C., Tan B., Xu L., Li H., Zhang L., Wang L., Liu S., Hou G., Liu Y., Xu Z., Sardans J., Peñuelas J., Warming effects on C : N : P stoichiometry and nutrient limitation in terrestrial ecosystems, *Soil and Tillage Research*, 2024, Vol. 235, 105896, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105896>.
26. Yuan X., Li S., Chen J., Yu H., Yang T., Wang C., Huang S., Chen H., Ao X., Impacts of Global Climate Change on Agricultural Production: A Comprehensive Review, *Agronomy*, 2024, Vol. 14 (7), 1360, DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy14071360>.
27. Zhou J., Li W., Ciais P., Gasser T., Wang J., Li Z., Zhu L., Han M., He J., Sun M., Liu L., Huang X., Contributions of countries without a carbon neutrality target to limit global warming, *Nature Communications*, 2025, Vol. 16 (1), 468, DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-024-55720-x>.

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2026-127-72-91



### **Ссылки для цитирования:**

Черноусенко Г.И. Анализ свойств засоленных почв Усть-Ордынского Бурятского округа Иркутской области // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2026. Вып. 127. С. 72-91. DOI: 10.19047/0136-1694-2026-127-72-91

### **Cite this article as:**

Chernousenko G.I., Analysis of the properties of saline soils of the Ust-Orda Buryat district of the Irkutsk region, Dokuchaev Soil Bulletin, 2026, V. 127, pp. 72-91, DOI: 10.19047/0136-1694-2026-127-72-91

### **Благодарность:**

Работа выполнена по теме FGUR-2025-0001: “Исследовать внутриполе-вую неоднородность, трансформацию, эволюцию, деградацию почвенного покрова агроландшафтов на разных уровнях организации на основе сочетания наземных обследований и цифровых технологий” в рамках госзадания Минобрнауки.

### **Acknowledgments:**

The work research was carried out on the topic FGUR-2025-0001: “To study the intra-field heterogeneity, transformation, evolution, and degradation of the soil cover of agricultural landscapes at different levels of organization based on a combination of ground surveys and digital technologies” within the framework of the State Assignment of the Ministry of Education and Science.

## **Анализ свойств засоленных почв Усть-Ордынского Бурятского округа Иркутской области**

© 2026 г. Г. И. Черноусенко

*ФИЦ “Почвенный институт им. В.В. Докучаева”, Россия,  
119017, Москва, Пыжевский пер, 7, стр. 2,*

*<https://orcid.org/0000-0001-6367-5839>, e-mail: [chergi@mail.ru](mailto:chergi@mail.ru).*

*Поступила в редакцию 11.03.2025, после доработки 25.03.2025,  
принята к публикации 27.01.2026*

**Резюме:** Цель данной работы – на основе имеющихся аналитических данных провести анализ свойств засоленных почв Усть-Ордынского Бурятского округа Иркутской области, так как это один из наиболее

освоенных округов с точки зрения сельского хозяйства. Массив данных содержит информацию о 122 разрезах почв разного гидроморфизма, из которых 109 засолены. Анализ проведен методами непараметрической статистики в целом по округу, по отдельным районам и почвам разного гидроморфизма. Автоморфные и полугидроморфные почвы чаще имеют слабую степень засоления, тип химизма сульфатный магниевонариевый. Чаще и сильнее засолены преимущественно гидроморфные почвы, их свойства и определяют свойства засоленных почв округа в целом. По медиане засоленные почвы округа преимущественно среднесуглинистые, pH 7.6–7.96, содержание карбонатов 18%, гипса – 8%. По медиане в округе в целом преобладают средnezасоленные почвы сульфатно-натриево-магниевого химизма с гипсом. В округе среди анионов преобладают сульфаты, катионов – магний, реже натрий. Хлориды в засоленных почвах встречаются во многих районах, составляя в общем 22% выборки, но ни в одном из районов не доминируют. В 24% выборки встречается токсичная щелочность, значения которой чаще ниже 1 смоль(экв)/кг, которая в 75% случаев определяется наличием гидрокарбоната магния. В 25% случаев она имеет содовую природу. В горизонтах, где щелочность определяется содой, химизм чаще щелочно-хлоридный или хлоридный с токсичной щелочностью.

**Ключевые слова:** массив данных; водная вытяжка; химизм; степень засоления; pH; гранулометрический состав; карбонаты; гипс.

## **Analysis of the properties of saline soils of the Ust-Orda Buryat district of the Irkutsk region**

© 2026 G. I. Chernousenko

*Federal Research Centre “V.V. Dokuchaev Soil Science Institute”,  
7 Bld. 2 Pyzhevskiy per., Moscow 119017, Russian Federation,  
<https://orcid.org/0000-0001-6367-5839>, e-mail: [chergi@mail.ru](mailto:chergi@mail.ru).*

*Received 11.03.2025, Revised 25.03.2025, Accepted 27.01.2026*

**Abstract:** The objective of this study is to analyze the properties of saline soils in the Ust-Orda Buryat Okrug of the Irkutsk Region, one of the most agriculturally developed districts, using available analytical data. The dataset contains information on 122 soil profiles of varying hydromorphism, 109 of which are saline. Nonparametric statistics were used to analyze the soil profiles for the district as a whole, as well as for individual areas and soils of varying hydromorphism. Automorphic and semi-hydromorphic soils often exhibit a low degree of salinity and a magnesium-sodium sulfate soil type.

Predominantly hydromorphic soils are more frequently and strongly saline, and their properties determine the overall saline soil profile in the district. According to the median, saline soils in the district are predominantly medium loamy, with a pH of 7.6–7.96, a carbonate content of 18%, and a gypsum content of 8%. According to the median, moderately saline soils of sodium-magnesium sulfate composition with gypsum predominate in the district as a whole. Sulfates predominate among the anions in the district, while magnesium and, less frequently, sodium are the cations. Chlorides are present in saline soils in many areas, accounting for 22% of the sample overall, but do not predominate in any area. Toxic alkalinity is present in 24% of the sample, with values typically below 1 cmol(eq)/kg, which is determined by the presence of magnesium bicarbonate in 75% of cases. In 25% of cases, this alkalinity is of sodic origin. In horizons where alkalinity is determined by soda, the composition is most often alkaline-chloride or chloride with toxic alkalinity.

**Keywords:** dataset; water extract; chemistry; degree of salinity; pH; granulometric composition; carbonates; gypsum.

## ВВЕДЕНИЕ

Проводить анализ наличия засоленных почв лишь на основании имеющихся карт не совсем корректно. Необходимо иметь подтверждение конкретными аналитическими данными о засолении почв. Цель данной работы – на основе имеющихся аналитических данных о засолении провести анализ свойств засоленных почв одного из наиболее сельскохозяйственно освоенных округов Иркутской области – Усть-Ордынского Бурятского округа.

Иркутская область делится на 3 сельскохозяйственные зоны: остепненную, лесостепную, подтаежно-таежную. По природным особенностям исследуемый округ включает основные остепненные и лесостепные территории области, в горах – подтаежные. Остепненная зона, расположенная в Усть-Ордынском Бурятском округе, состоит из 2 ареалов: Аларско-Нукутского и Усть-Ордынско-Баяндаевского. Это основная сельскохозяйственная зона области. Она находится в центре Иркутской области и характеризуется относительно более благоприятными климатическими условиями, по сравнению с другими районами области. Почвенно-климатические условия округа (остепненные, лесостепные территории) с преобладанием равнинного рельефа предопределяют

максимально возможное распространение здесь засоленных почв, которые в основном приурочены к долинам рек, занимая поймы и первые надпойменные террасы.

Несмотря на то, что в Иркутской области находится один из самых больших в мире по территории и запасам Ангаро-Ленский солевой бассейн, засоленные почвы встречаются здесь фрагментарно, занимая незначительные площади. Это связано с двумя основными причинами – глубиной залегания солей и засоленных подземных вод (более 300 м) и климатом с преобладанием КУ близкого к единице или выше. В местах, где подземные воды подходят к поверхности, локальное засоление почв наблюдается даже в таежной зоне.

Наличие здесь засоленных почв было отмечено еще в конце XIX в. в работах Н.Н. Агапитова (1878) и Я.П. Прейна (1890). Позже И.В. Николаев (1949) писал “...комплекс из чередующихся солончаков и степей долин с облесенными северными склонами и водораздельными плато принимается как облик лесостепи” (стр. 96). Наличие на террасах солонцеватых черноземов было отмечено Б.В. Надеждиным (1961), а также выделено им на почвенной карте округа (1959), согласно которой они имеют достаточно широкое распространение как основная почва. Широко распространенные здесь в качестве почвообразующих пород гипсоносные (гажевые) отложения были отмечены в работах Б.В. Надеждина (1961) и Ш.Д. Хисматуллина (1962).

Климат округа резко континентальный. Основную его часть занимает лесостепная и степная зоны Иркутско-Черемховской равнины Иркутского амфитеатра – южной части Средне-Сибирского плоскогорья. Преобладают холмисто-увалистые, а также равнинные формы рельефа. В ряде районов (Нукутский, Осинский) широко развит гипсовый карст, что определяет в этих районах преимущественно сульфатный химизм засоления почв с гипсом. Формирование почв на гажевых отложениях также отмечено и в Эхирит-Булагатском и Баяндаевском районах, что формирует преимущественно сульфатный химизм засоления, часто с гипсом. Грунтовые воды имеют в основном гидрокарбонатный и сульфатный состав с минерализацией чаще до 1 г/л.

Подробно климатические, площадные параметры, а также

засоленные почвы, которые встречаются в том или ином районе Иркутской области, были описаны в статье Г.И. Черноусенко, П.В. Королёвой (2025).

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования были засоленные почвы шести районов Усть-Ордынского Бурятского округа Иркутской области: Аларского, Баяндаевского, Боханского, Нукутского, Осинского и Эхирит-Булагатского. Площадь округа составляет 22 400 км<sup>2</sup> или 2 240 тыс. га (Административно-территориальное деление..., 2024). Учитывая, что в Иркутской области 90% территории занято лесами, а сельхозугодья занимают в районах области в среднем от 0.1% до 3.2%, можно отметить, что в 4 районах Усть-Ордынского Бурятского округа процент сельхозугодий выше и составляет 5.1–6.5% (Чернигова, Тулунова, 2019). Это наиболее освоенные в сельском хозяйстве районы области.

В единую таблицу в программе Excel был внесен массив данных аналитических свойств засоленных почв округа. Авторские названия почв были сохранены. В Аларском районе представлены торфяно-глеевые, перегнойно-торфяно-глеевые, лугово-болотные дерново-луговые, и луговые почвы. Значительная часть разрезов, отмеченная в очерках хозяйств Аларского района как засоленные, по токсичным солям не засолены. Повышенный плотный остаток связан с наличием гипса, карбоната кальция или с органическим веществом. В Баяндаевском районе отмечены дерново-карбонатные солончаковые, черноземы солончаковатые и солонцеватые, солонцы луговые, лугово-черноземные, луговые, лугово-болотные, перегнойно-торфяно-глеевые, аллювиально-луговые, солончаки луговые. В Боханском районе встречаются солонцы степные, черноземно-луговые солончаковатые и солончаковые, луговые, аллювиально-луговые, перегнойно-торфяно-болотные и солончаки луговые. В Нукутском районе имеется информация о засолении луговых, аллювиально-луговых, лугово-черноземных и даже дерново-карбонатных почв, а также солонцов степных, черноземов солонцеватых и солончаков гажевых. В Осинском районе отмечены лугово-черноземные солончаковатые и солонцеватые, дерново-луговые, луговые, солончаки луговые

чаще гажевые (гипсоносные). В Эхирит-Булагатском районе выделены черноземы южные солончаковатые, луговые, аллювиально-луговые, лугово-болотные, иловато-болотные, солончаки луговые и гажевые.

Аналитические материалы необходимы как для анализа и оценки свойств засоленных почв, так и для верификации карты засоления почв округа и Иркутской области в целом, которая не должна противоречить наземным исследованиям. На основании имеющихся данных на разном иерархическом уровне был проведен сравнительный статистический анализ свойств засоленных почв отдельных районов и округа в целом. Оценка проведена методами непараметрической статистики по минимальным, максимальным значениям, верхнему и нижнему квартилю, по медиане значений и среднему.

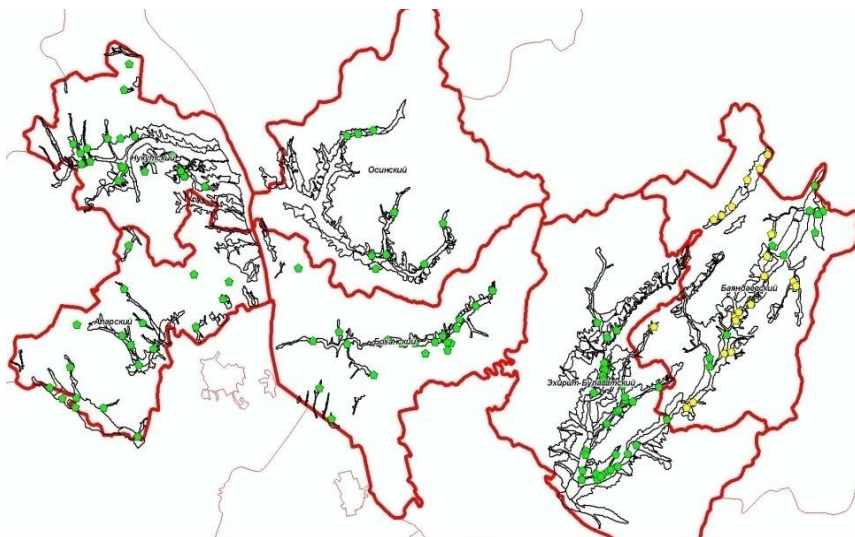
## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Массив данных включает информацию о геоморфологической привязке разреза, административном районе, источнике информации о разрезе, авторские номер и название почвы (исправленное при необходимости название по классификации 1977 г., согласно данным анализов), координатной привязке разреза, данные водных вытяжек, рН, гумуса, поглощенных оснований, гранулометрического состава, содержания карбонатов и гипса. На настоящий момент массив данных засоленных почв Усть-Ордынского Бурятского округа содержит информацию по 122 разрезам (590 горизонтам).

В первую очередь анализировались данные водных вытяжек. Информация бралась из литературных источников (Надеждин, 1961; Хисматуллин, 1962; Морозова, 1988; Черноусенко и др., 2005; Лопатовская и др., 2010; Лопатовская и др., 2012), а также из фондовых материалов – очерков к почвенным картам, составленных Гипроземом в 1964–2003 гг. Из 64 хозяйств округа, которые были изучены, наличие аналитических данных водных вытяжек было в 40 хозяйствах. Кроме того, были использованы авторские данные, полученные во время экспедиций.

Карта фактического материала, с географической привязкой разрезов, имеющих аналитические данные водных вытяжек, пред-

ставлена на рисунке 1.



**Рис. 1.** Усть-Ордынский Бурятский округ. Карта фактического материала с привязанными разрезами почв, имеющих аналитическую информацию по засолению с учетом контуров засоленных почв.

**Fig. 1.** Ust-Orda Buryat Okrug. Map of factual material with referenced sections of saline soils, having analytical information on salinization taking into account the contours of saline soils.

Из 122 разрезов, согласно данным водных вытяжек и классификации засоления почв (Базилевич, Панкова, 1968), наличие засоления отмечено в 109 разрезах. Ряд разрезов, которые описаны в очерках хозяйств как засоленные, по данным водных вытяжек оказались не засолены. Краткая характеристика свойств засоленных почв Усть-Ордынского Бурятского округа Иркутской области в целом и по отдельным районам приведена в таблице 1.

**Таблица 1.** Свойства засоленных почв Усть-Ордынского Бурятского округа Иркутской области (приведены медианные значения, в скобках разброс значений)

**Table 1.** Properties of saline soils of the Ust-Orda Buryat Okrug of the Irkutsk Region (median values are given, the range of values is in brackets)

Район, округ	Химизм	Степень засоления	pH	CaCO <sub>3</sub> , %	Гипс, % (% в выборке по ВВ)	Физ. глина <0.01 мм, %
Усть-Ордынский Бурятский округ	Сульфатный с гипсом натриево-магниевый	средняя	7.8	18 (0.4–69)	8 (0.04–99, по ВВ есть в 52%)	36 (9–91)
Аларский	Хлоридно-сульфатный магниевно-натриевый	средняя	8.0	19 (0–55)	Нд (по ВВ есть в 15%)	47 (19–63)
Баяндаевский	Сульфатный с токсичной щелочностью натриевый	слабая	7.6	41 (12–77)	Нд (по ВВ в 13%)	40 (14–71)
Боханский	Сульфатный магниевый	слабая	7.8	36 (8–59)	Нд (по ВВ есть в 49%)	28 (12–49)
Нукутский	Сульфатный с гипсом натриево-магниевый	сильная	7.88	11 (0.4–37)	7 (0.04–94, по ВВ в 71%)	29 (9–52)
Осинский	Сульфатный с гипсом натриево-магниевый	средняя	7.6	нд	Нд (по ВВ в 74%)	33 (27–44)
Эхирит-Булгатский	Сульфатный с гипсом натриево-магниевый	средняя	7.96	28 (2–59)	18 (0.1–99, по ВВ есть в 63%)	42 (16–65)

Как видно из таблицы 1, согласно имеющимся материалам, в целом в засоленных почвах округа по медиане преобладает сульфатный натриево-магниевый химизм засоления с гипсом, степень засоления почв средняя. Подобный же химизм преобладает в почвах Нукутского и Осинского районов округа. Сульфатный тип засоления с гипсом при однозначном доминировании среди катионов магния (63% от суммы катионов) преобладает в Эхирит-Булагатском районе. Можно предположить, что схожий химизм имеют и засоленные почвы Боханского района. Так в Боханском районе в 49% выборки, согласно данным водных вытяжек, встречается гипс, но это меньше 50%, что не позволило охарактеризовать химизм как сульфатный с гипсом магниевый, степень засоления почв этого района преимущественно слабая.

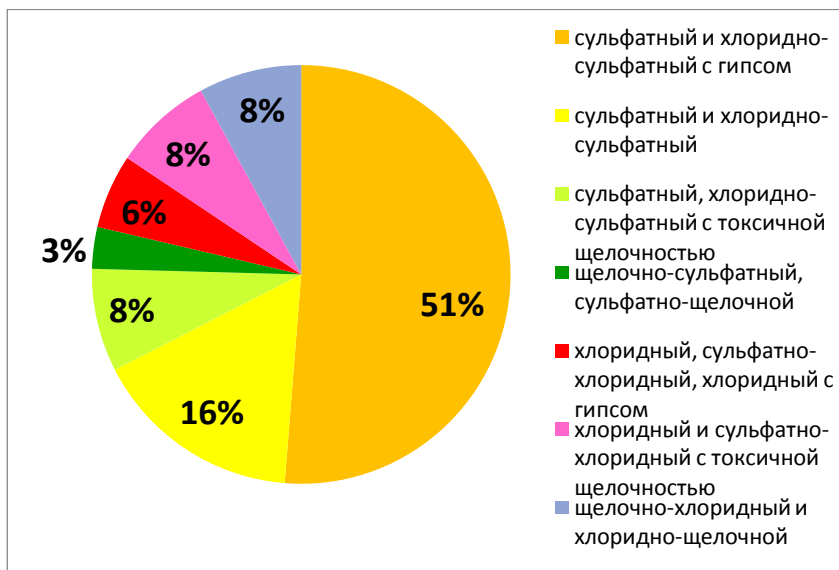
Почвы данных районов часто формируются на гажевых отложениях (Хисматуллин, 1962; Черноусенко и др., 2005; Киселева, Лопатовская, 2010; Chernousenko, Yamnova, 2019; Ямнова, Черноусенко, 2023). Натрий среди катионов преобладает лишь в двух районах – Аларском и Баяндаевском, причем в последнем появляется токсичная щелочность, связанная не столько с содой, сколько с гидрокарбонатом магния, степень засоления почв Баяндаевского района преимущественно слабая.

Хлориды в засоленных почвах присутствуют во многих районах округа, в ряде разрезов они могут даже доминировать, но при статистической обработке данных они попадают в нижний квартиль и не выходят на уровень медианных значений.

Более подробный анализ химизма засоления почв округа в целом приведен на рисунке 2. Согласно имеющимся материалам, преобладают почвы сульфатного и хлоридно-сульфатного засоления с гипсом – 51% (рис. 2). Из 51% доля только сульфатного с гипсом засоления без участия хлоридов – 43%.

Сульфатное и хлоридно-сульфатное засоление без участия гипса отмечено в 16% выборки, из них доля почв чисто сульфатного засоления составляет 12.4%, хлоридно-сульфатного – 3.7%. Еще в 11% выборки (8 + 3%) к сульфатному химизму засоления прибавляется токсичная щелочность, не содовой природы, а связанная, согласно расчетам, с гидрокарбонатом магния.

Частое доминирование в гипсосодержащих почвах магния среди катионов, особенно при слабой и средней степени засоления, было статистически доказано ранее. Также в гипсосодержащих почвах была отмечена щелочность, связанная с гидрокарбонатом магния (Черноусенко и др., 2023).



**Рис. 2.** Химизм засоления почв Усть-Ордынского Бурятского округа Иркутской области.

**Fig. 2.** Chemistry of soil salinization in the Ust-Orda Buryat district of the Irkutsk region.

Почвы с преобладающими в засолении хлоридами также встречаются, составляя в общем 22% выборки, при этом непосредственно хлоридное, сульфатно-хлоридное, в том числе с гипсом засоление отмечено лишь в 6% разрезов, 16% составляют почвы, где, кроме хлоридов и сульфатов, в разной степени присутствует щелочность. Щелочность в данных почвах может быть связана как с гидрокарбонатом магния, так и с содой.

В целом из засоленных 373 горизонтов токсичная щелочность в той или иной степени отмечена в 88 горизонтах или в 23.6%. При этом ее значения обычно ниже 1 смоль(экв)/кг и лишь в 9 горизонтах несколько выше 1.01–1.92 смоль(экв)/кг. Во всех 88 горизонтах имеет место токсичная щелочность, связанная с гидрокарбонатом магния, в 37 (42%) дополнительно проявляется щелочность, связанная с содой, которая лишь в 22 образцах (25%) преобладает. В горизонтах, где преобладает щелочность содовой природы, химизм чаще щелочно-хлоридный или хлоридный с токсичной щелочностью.

Степень щелочности (рН) в целом по округу составляет для засоленных почв по медиане значений 7.8, при колебании по районам от 7.6 до 7.96 (табл. 1), поднимаясь в отдельных горизонтах до 8.1–8.9.

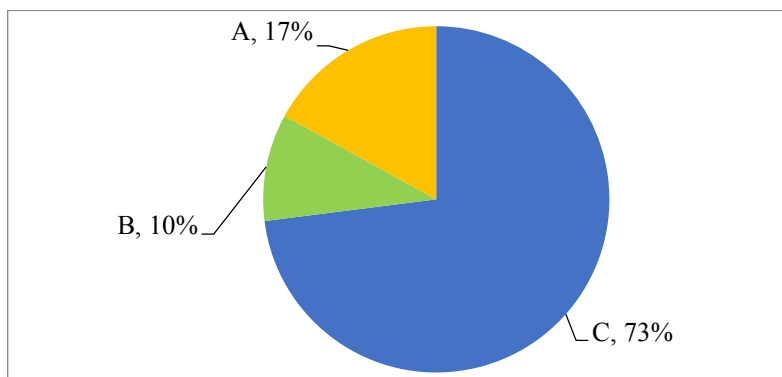
По содержанию карбонатов почвы округа по медиане в целом среднекарбонатные 18% (табл. 1). По отдельным районам содержание карбонатов колеблется по округу от карбонатных (11% в Нукутском районе), до сильнокарбонатных (37–41% в Боханском и Баяндаевском районах). В половине районов почвы среднекарбонатные. Оценка степени карбонатности дана по классификации, приведенной в монографии “Засоленные почвы России” (2006).

По содержанию гипса в округе в целом по медиане почвы слабогипсоносные – по Классификации 1977 г., или среднегипсоносные – по классификации ФАО (Руководство..., 2012) (табл. 1). В Эхирит-Булагатском районе соответственно среднегипсоносные или сильногипсоносные, хотя ряд разрезов является очень сильногипсоносными, с содержанием гипса более 40%. Гипс добывается в Нукутском и Осинском районах. По медиане имеющихся значений засоленные почвы Нукутского района слабогипсоносные по Классификации 1977, или среднегипсоносные по ФАО (Руководство..., 2012), при том что встречаются очень сильногипсоносные горизонты с содержанием гипса до 52%. Аналитических данных о содержании гипса по Осинскому району крайне мало, несмотря на то что в районе гипс добывается. Хотя и в почвах Осинского района в ряде горизонтов содержание гипса составляет 16%. Корректно оценить гипсоносность засоленных почв по имеющимся данным сложно из-за отсутствия масштабных специальных исследова-

дований. Аналитические данные о содержании гипса приведены для 113 горизонтов из 589, расчет по данным водных вытяжек показал наличие гипса в 199 горизонтах.

Гранулометрический состав засоленных почв округа в целом по медиане характеризуется как среднесуглинистый, с колебаниями по районам от легкого до тяжелого суглинка.

Проведенный по имеющимся данным анализ встречающихся в округе засоленных почв разного гидроморфизма показал следующее (рис. 3).



**Рис. 3.** Доля засоленных почв разного гидроморфизма. А – автоморфные; В – полугидроморфные; С – гидроморфные.

**Fig. 3.** The proportion of saline soils of different hydromorphism. А – automorphic; В – semi-hydromorphic; С – hydromorphic.

Однозначно преобладают (73% выборки) засоленные гидроморфные почвы: луговые, аллювиальные, различные болотные почвы (лугово-болотные, перегнойно-торфяные и др.), луговые солончаки. На второе место вышли автоморфные почвы (17% выборки), которые реже встречаются и не во всех районах округа. Засоленные автоморфные почвы представлены солонцеватыми черноземами и степными черноземными солонцами. Несмотря на то что полугидроморфные черноземно-луговые засоленные почвы встречаются чаще автоморфных причем во всех районах округа, процент этих почв, по имеющимся данным, наименьший – 10%.

Это одно из отрицательных свойств баз данных в целом, так как в базы обычно попадают материалы пространственно не одинаково распределенные (Черноусенко, 2022). Поэтому для более корректной оценки засоления и распределения засоленных почв необходимо составление среднemasштабных карт засоленных почв с обязательным учетом аналитических данных географически привязанных разрезов.

Анализ свойств засоленных почв разного гидроморфизма показал следующее. По медиане засоленные автоморфные почвы имеют слабое сульфатное магниево-натриевое засоление. В степных черноземных солонцах и черноземах солончаковатых и солонцеватых степень засоления, при том же химизме, средняя. Среди автоморфных почв в Нукутском районе и Баяндаевском (ранее в 1967 г. – Эхирит-Булагатском) были выделены дерново-карбонатные засоленные почвы (Киселева, Лопатовская, 2010; Почвы колхоза им. Борсоева, 1967), в классификации 1977 г. не выделяемые. В засолении этих почв участвуют сульфаты часто в виде гипса и хлориды. Химизм засоления дерново-карбонатных почв по медиане хлоридный с токсичной щелочностью, связанной как содой, так и с гидрокарбонатом магния. Генезис засоления этих почв не совсем понятен. Это или палеозасоленные почвы, или засоление идет за счет подпитки хлоридными водами, тогда эти почвы некорректно диагностированы как автоморфные.

Полугидроморфные почвы имеют по медиане слабое сульфатное магниево-натриевое засоление.

Наибольшую долю имеют гидроморфные засоленные почвы. Эти почвы по медиане значений имеют засоление средней степени сульфатное с гипсом натриево-магниевое. Они и определяют химизм засоления почв округа в целом. Магний доминирует среди катионов во всех квартилях выборки. По районам химизм засоления гидроморфных почв по медиане значений следующий. В Аларском и Баяндаевском районах имеет место слабое сульфатное магниево-натриевое засоление. В Боханском, Нукутском и Эхирит-Булагатском районах – засоление сульфатное с гипсом магниевое, средней степени – в Боханском и Эхирит-Булагатском, и сильной степени – в Нукутском. В Осинском районе засоление среднее сульфатное с гипсом магниево-натриевое.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ свойств засоленных почв Усть-Ордынского Бурятского округа показал следующее. По медиане в округе в целом преобладают средnezасоленные почвы сульфатно-натриево-магниевого химизма с гипсом. Отдельно по районам картина несколько иная. В Аларском районе преобладают почвы средней степени засоления хлоридно-сульфатного магниево-натриевого химизма; в Баяндаевском – слабого сульфатно-натриевого с токсичной щелочностью; в Боханском – слабого сульфатно-магниевого; в Нукутском – сильного сульфатного натриево-магниевого с гипсом; в Осинском – среднего сульфатного натриево-магниевого с гипсом; в Эхирит-Булагатском – среднего сульфатно-магниевого с гипсом. Таким образом, в округе среди анионов преобладают сульфаты, катионов – магний, реже натрий.

Хлориды в засоленных почвах встречаются во многих районах, составляя в общем 22% выборки, но ни в одном из районов не доминируют.

В 24% выборки встречается щелочность, значения которой чаще ниже 1 смоль(экв)/кг. В основном токсичная щелочность определяется наличием гидрокарбоната магния, в 25% случаев она имеет содовую природу. В горизонтах, где щелочность определяется содой, химизм чаще щелочно-хлоридный или хлоридный с токсичной щелочностью.

Степень щелочности (рН) в целом по округу составляет для засоленных почв по медиане значений 7.8, при колебании по районам от 7.6 до 7.96, поднимаясь в отдельных горизонтах до 8.1–8.9.

Гранулометрический состав засоленных почв округа преимущественно среднесуглинистый, с колебанием от легкого до тяжелого суглинка.

По содержанию карбонатов, по имеющимся данным, почвы округа по медиане в целом среднекарбонатные (18%), при колебании по районам от карбонатных (Нукутский район) до сильнокарбонатных (Боханский и Баяндаевский районы).

По содержанию гипса в целом по округу по медиане засоленные почвы слабогипсоносные (8%) по классификации 1977 г.,

или среднегипсоносные по классификации ФАО (Руководство..., 2012). Встречаются горизонты очень сильногипсоносные с содержанием гипса 60–92%. Подобные почвы формируются на первых надпойменных террасах и в поймах рек Куда, Ишин-Гол, Исай Эхирит-Буллагатского района, Унга Нукутского района. Аналитических определений гипса для статистической оценки порайонно недостаточно. Так, по Осинскому району, где гипс добывается, аналитических данных найти не удалось. Расчет по данным водных вытяжек показал наличие гипса в 47% выборки.

В массиве данных 73% выборки составляют засоленные гидроморфные почвы (луговые, аллювиальные, болотные, луговые солончаки); 17% – автоморфные (черноземы солонцеватые и солонцы степные); 10% – полугидроморфные засоленные почвы. Подобное соотношение засоленных почв разного гидроморфизма, вероятно не совсем корректно. Согласно данным отчетов Гипрозема и данным легенд почвенных карт хозяйств, полугидроморфные засоленные почвы встречаются чаще автоморфных, и, вероятно, их процент выше. На наш взгляд, это один из отрицательных моментов практически любых баз данных, в которых имеющиеся данные неравномерно распределены в пространстве. В базы попадают данные по отдельным местам, контурам или почвам, в которых велись специальные исследования. При этом почвы других контуров, в которых, согласно картам, присутствуют засоленные почвы, не имеют аналитической информации. По этой же причине затруднена статистическая оценка свойств разных типов засоленных почв порайонно, возможен перекося в выборке сильнозасоленных почв, мало данных по глубокозасоленным почвам.

Статистический анализ свойств засоленных почв разного гидроморфизма показал следующее. По медиане засоленные автоморфные и полугидроморфные почвы имеют слабое сульфатное магниево-натриевое засоление. Гидроморфные почвы, которые доминируют среди засоленных почв округа, имеют среднее сульфатное с гипсом натриево-магниевое засоление. Они в целом и определяют химизм и степень засоления почв округа. Магний доминирует среди катионов во всех квартилях выборки округа. Гипс и магний не во всех районах доминирует в гидроморфных засоленных почвах – в Аларском и Баяндаевском районах, согласно

имеющимся данным, засоление слабое сульфатное магниевонатриевое.

Постановлением Правительства от 27 декабря 2023 г. одними из основных приоритетов и целей государственной политики является рациональное использование и совершенствование оборота сельскохозяйственных земель, создание информационной системы о землях сельскохозяйственного назначения, а также сохранение благоприятной окружающей среды и природно-ресурсного потенциала, особенно в части сохранения и повышения плодородия почв. Для решения этих задач необходимо иметь не только базы данных о почвах сельскохозяйственных земель, но и географически распределенную картографическую информацию о них. Карты о засолении почв Иркутской области имеются лишь в обзорном масштабе – 1 : 2.5 млн. Более крупномасштабные карты информацию о степени и химизме засоления обычно не имеют. Для решения вопросов их рационального использования, вовлечения или невовлечения засоленных земель в оборот необходимо оценить распределение площадей засоленных почв того или иного химизма и степени засоления по округу. Это требует составления среднemasштабной карты засоления почв, с обязательным учетом аналитических данных.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аганитов Н.Н.* Краткий отчет о поездке в Балаганский и Иркутский округ летом 1977 г. // Известия ВСОРГО. 1978. Т. 9. № 3–4. С. 80–95.
2. Административно-территориальное деление Иркутской области. 2024. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Административно-территориальное\\_деление\\_Иркутской\\_области](https://ru.wikipedia.org/wiki/Административно-территориальное_деление_Иркутской_области).
3. *Базилевич Н.И., Панкова Е.И.* Методические указания по учету засоленных почв. М.: Гипроводхоз, 1968. 91 с.
4. Засоленные почвы России. М.: ИКЦ “Академкнига”, 2006. 854 с.
5. *Киселева Н.Д., Лопатовская О.Г.* Особенности профильного распределения гипса в некоторых почвах Приангарья // Вестник КрасГАУ. 2010. № 9. С. 17–22.
6. Классификация и диагностика почв СССР. М.: Колос. 1977. 223 с.
7. *Лопатовская О.Г., Двуреченский В.Г., Лазарева С.Л., Киселева Н.Д.* Почвы техногенных ландшафтов гипсового рудника “Новонкутский” в

- Приангарье // Известия Иркутского государственного университета. Сер. Биология. Экология. 2012. № 2. С. 81–87.
8. *Морозова К.В.* Водно-растворимые соли в южных черноземах Кудинской лесостепи // Почвы юга Средней Сибири. Иркутск: ИГУ, 1988. С. 49–55.
9. *Надеждин Б.В.* Лено-Ангарская лесостепь. М.: АН СССР, 1961. 327 с.
10. *Николаев И.В.* Почвы Иркутской области. Иркутск: ОГИЗ. 1949. 421 с.
11. Почвенная карта Усть-Ордынского Национального округа. М 1 : 200 000. Составил *Надеждин Б.В.* 1959.
12. Почвы колхоза им. Борсоева Эхирит-Булагатского района Иркутской области и рекомендации по их использованию, МСХ РСФСР Иркутская землеустроительная экспедиция института “РОСГИПРОЗЕМ”, Иркутск, 1967. 57 с.
13. *Прейн Я.П.* Очерк почв Балаганского округа // Материалы по исследованию землепользования и хозяйственного быта сельского населения Иркутской и Енисейской губерний. М., Иркутск: 1890. Т. 2. Иркутская губерния. Вып. 1. Гл. 1. С. 64–85.
14. Руководство по описанию почв. ФАО. Рим: Продовольственная и сельскохозяйственная организация объединенных наций. 2012. 101 с.
15. *Хисматуллин Ш.Д.* Засоленные почвы речных долин Верхнего Приангарья // Тр. I Сибирской конференции почвоведов. Красноярск, 1962. С. 298–315.
16. *Чернигова Д.Р., Тулунова Е.С.* Особенности развития сельскохозяйственного землепользования Иркутской области. // Московский экономический журнал. 2019. № 2. С. 7–15. DOI: <https://doi.org/10.24411/2413-046X-2019-12006>.
17. *Черноусенко Г.И.* Засоленные почвы котловин юга Восточной Сибири. М.: МАКС Пресс, 2022. 480 с.
18. *Черноусенко Г.И., Королёва П.В.* Засоленные почвы Иркутской области на крупномасштабных почвенных картах // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2025. Вып. 122. С. 229–255. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2025-122-229-255>.
19. *Черноусенко Г.И., Лопатовская О.Г., Ямнова И.А.* Распространение, химизм и генезис засоленных почв Предбайкалья // География и природные ресурсы. 2005. № 2. С. 84–92.
20. *Черноусенко Г.И., Хитров Н.Б., Панкова Е.И.* Магний в засоленных гипсодержащих почвах России// Почвоведение. 2023. № 7. С. 815–830. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0032180X23600026>.

21. Ямнова И.А., Черноусенко Г.И. Гипсоносные гажевые почвы суббореального пояса Евразии // Почвоведение. 2023. № 1. С. 3–19. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0032180X22600603>.
22. Chernousenko G.I., Yamnova I.A. Gazha Soils of Russia // Proc. 19<sup>th</sup> International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM. 2019. Vol. 19. Iss. 3.2. Soils Forest Ecosystems. Sofia: STEF92 Technology Ltd., Bulgaria. P. 231–238. DOI: <https://doi.org/10.5593/sgem2019/3.2/S13.031>.

## REFERENCES

1. Agapitov N.N., Kratkii otchet o poezdke v Balaganskii Irkutskii okrug letom 1977 g. (Brief report on the trip to the Balagansky and Irkutsk districts in the summer of 1977), *Izvestiya VSORGO*, 1978, Vol. 9, No 3–4, pp. 80–95.
2. Administrativno-territorial'noe delenie Irkutskoi oblasti (Administrative-territorial division of the Irkutsk region), 2024, URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Административно-территориальное\\_деление\\_Иркутской\\_области](https://ru.wikipedia.org/wiki/Административно-территориальное_деление_Иркутской_области).
3. Bazilevich N.I., Pankova E.I., *Metodicheskie ukazaniya po uchetu zasolennykh pochv* (Methodical guidelines for accounting of saline soils), Moscow: Giprovodkhoz, 1968, 91 p.
4. *Zasolennye pochvy Rossii* (Saline soils of Russia), Moscow: IKC “Akademkniga”, 2006, 854 p.
5. Kiseleva N.D., Lopatovskaya O.G., Osobennosti profil'nogo raspredeleniya gipsa v nekotorykh pochvakh Priangar'ya (Features of the profile distribution of gypsum in some soils of the Angara region), *Vestnik KrasGAU*, 2010, No. 9, pp. 17–22.
6. *Klassifikacija i diagnostikapochv SSSR* (Classification and diagnostics of soils of the USSR), Moscow: Kolos, 1977, 223 p.
7. Lopatovskaya O.G., Dvurechenskii V.G., Lazareva S.L., Kiseleva N.D., Pochvy tekhnogennykh landshaftov gipsovogo rudnika “Novonukutskii” v Priangar'e (Soils of technogenic landscapes of the Novonukutsky gypsum mine in the Angara region), *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Biologiya. Ekologiya*, 2012, No. 2, pp. 81–87.
8. Morozova K.V., Vodno-rastvorimye soli v juzhnyh chernozemah Kudinskoj lesostepi (Water-soluble salts in the southern chernozems of the Kudinsk forest-steppe), In: *Pochvy juga Srednej Sibiri*, Irkutsk: IGU, 1988, pp. 49–55.
9. Nadezhdin B.V., *Leno-Angarskaja lesostep'* (Leno-Angara forest-steppe), Moscow: AN SSSR, 1961, 327 p.
10. Nikolaev I.V., Pochvy Irkutskoi oblasti (Soils of the Irkutsk region), Irkutsk: *OGIZ*, 1949, 421 p.

11. Pochvennaya karta Ust'-Ordynskogo Natsional'nogo okruga (Soil map of the Ust-Orda National Okrug), Scale 1 : 200 000, Compiled by Nadezhdin B.V., 1959.
12. Pochvy kolkhoza im. Borsoeva Ekhirit-Bulagatskogo raiona Irkutskoi oblasti i rekomendatsii po ikh ispol'zovaniyu (Soils of the Borsoev collective farm of the Ekhirit-Bulagat district of the Irkutsk region and recommendations for their use), Irkutsk: MSKh RSFSR Irkutskaya zemleustroitel'naya ekspeditsiya instituta "ROSGIPROZEM", 1967, 57 p.
13. Prein Ya.P., Ocherk pochv Balaganskogo okruga (Essay on the soils of the Balagansky district), *Materialy po issledovaniyu zemlepol'zovaniya i khozyaistvennogo byta sel'skogo naseleniya Irkutskoi Eniseiskoi gubernii* (Materials on the study of land use and economic life of the rural population of the Irkutsk and Yenisei provinces), Vol. II, Irkutskaya guberniya, Iss. 1, Ch. 1, Moscow: 1890, pp. 64–85.
14. Rukovodstvo po opisaniyu pochv (Manual for the description of soils), FAO, Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2012, 101 p.
15. Khismatullin Sh.D., Zasolennye pochvy rechnyh dolin Verhnego Priangar'ja (Saline soils of river valleys of the Upper Angara region), In: *Trudy I Sibirskoj konferencii pochvovedov*, Krasnojarsk, 1962, pp. 298–315.
16. Chernigova D.R., Tulunova E.S., Osobennosti razvitiya sel'skohozjajstvennogo zemlepol'zovaniya Irkutskoj oblasti (Features of the development of agricultural land use in the Irkutsk region), *Moskovskij ekonomicheskij zhurnal*, 2019, No. 2, pp. 7–15, DOI: <https://doi.org/10.24411/2413-046X-2019-12006>.
17. Chernousenko G.I., *Zasolennye pochvy kotlovin yuga Vostochnoi Sibiri* (Saline soils of the basins of the south of Eastern Siberia), Moscow: MAKS Press, 2022, 480 p.
18. Chernousenko G.I., Koroleva P.V., Saline soils of the Irkutsk region on large-scale soil maps, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2025, No. 122, pp. 229–255, DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2025-122-229-255>.
19. Chernousenko G.I., Lopatovskaya O.G., Yamnova I.A., Rasprostranenie, khimizm i genesis zasolennykh pochv Predbaikal'ya (Distribution, chemistry and genesis of saline soils in the Baikal region), *Geografija i prirodnye resursy*, 2005, No. 2, pp. 84–92.
20. Chernousenko G.I., Khitrov N.B., Pankova Ye.I., Magnesium in saline gypsum-bearing soils of Russia, *Eurasian Soil Science*, 2023, Vol. 56, No. 7, pp. 854–867, DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229323600537>.
21. Yamnova I.A., Chernousenko G.I., Gipsonosnye gazhevye pochvy subboreal'nogo poyasa Evrazii (Gypsum-bearing gypsum soils of the

subboreal belt of Eurasia), *Pochvovedenie*, 2023, No. 1, pp. 3–19,  
DOI: <https://doi.org/10.31857/S0032180X22600603>.

22. Chernousenko G.I., Yamnova I.A., Gazha Soils of Russia, *Proc. 19<sup>th</sup> International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2019*, 2019, Vol. 19, Iss. 3.2, Soils Forest Ecosystems, Sofia: STEF92 Technology Ltd., Bulgaria, pp. 231–238, DOI: <https://doi.org/10.5593/sgem2019/3.2/S13.031>.

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2026-127-92-125



### Ссылки для цитирования:

Герасимова М.И., Орлова К.С., Виндекер Г.В., Вернюк Ю.И., Соболев Н.С. Почвы парка “Дендрарий” города Сочи: признаки деградации // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2026. Вып. 127. С. 92-125. DOI: 10.19047/0136-1694-2026-127-92-125

### Cite this article as:

Gerasimova M.I., Orlova K.S., Vindeker G.V., Vernyuk Yu.I., Sobolev N.S., Soils of the “Arboretum” Park in Sochi: signs of degradation, Dokuchaev Soil Bulletin, 2026, V. 127, pp. 92-125, DOI: 10.19047/0136-1694-2026-127-92-125

### Благодарность:

Исследование выполнено в рамках грантового проекта: “Экологическое состояние почв и ландшафтов г. Сочи в постолимпийское десятилетие (2014–2024), разработка рекомендаций по восстановлению его уникальных природных территорий (на примере парка “Дендрарий”)” согласно договору № 01/2024-И.

### Acknowledgments:

The research was conducted within the framework of a grant-funded project titled: 'Ecological Condition of Soils and Landscapes in the City of Sochi during the Post-Olympic Decade (2014–2024), Formulation of Recommendations for the Restoration of Its Unique Natural Territories (a Case Study of the Arboretum Park)' under Agreement No. 01/2024-I.

## Почвы парка “Дендрарий” города Сочи: признаки деградации

© 2026 г. М. И. Герасимова<sup>1,2</sup>, К. С. Орлова<sup>1\*</sup>, Г. В. Виндекер<sup>1</sup>,  
Ю. И. Вернюк<sup>1</sup>, Н. С. Соболев<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/0000-0003-3063-0604>, e-mail: [orkse@yandex.ru](mailto:orkse@yandex.ru).

<sup>2</sup>МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия,  
119991, Москва, Ленинские горы, 1.

Поступила в редакцию 16.05.2025, после доработки 26.05.2025,  
принята к публикации 27.01.2026

**Резюме:** Сочинский Дендрарий расположен в интервале абсолютных высот 8–140 м и включает Нижний парк на плоской морской террасе и Верхний парк с участками ровных неогеновых террас и крутых склонов, что определяет различия в деградационных трендах: переувлажнение элювиально-поверхностно-глеевых желтоземов и эрозионно-оползневые процессы в желтоземах и дерновых почвах соответственно. Масштабы их относительно невелики. Рост переувлажнения проявляется в усилении внутрпочвенного оглеения и застоя воды на поверхности и объясняется нарушением работы поверхностного дренажа. В Верхнем парке переувлажнение локально и приурочено к отдельным небольшим западинам, а основными видами деградации является смыв (эрозия) и оползни, особенно заметные на очень крутом склоне под природным лесом, а также рекреационное уплотнение. Развитию деградационных процессов способствуют свойства желтоземных почв: тяжелый гранулометрический состав, высокая плотность и компактность срединных слабо водопроницаемых метаморфических горизонтов, участие смектита в составе илистой фракции, а также крутые склоны и большое количество осадков.

**Ключевые слова:** лесопарковый ландшафт; желтоземы; желтоземы элювиально-глеевые; переувлажнение; дренаж; эрозия; уплотнение почв.

## Soils of the “Arboretum” Park in Sochi: signs of degradation

© 2026 M. I. Gerasimova<sup>1,2</sup>, K. S. Orlova<sup>1\*</sup>, G. V. Vindeker<sup>1</sup>,  
Yu. I. Vernyuk<sup>1</sup>, N. S. Sobolev<sup>1,2</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/0000-0003-3063-0604>, e-mail: [orkse@yandex.ru](mailto:orkse@yandex.ru).*

<sup>2</sup>*Lomonosov Moscow State University,  
1 Leninskie Gori, Moscow 119991, Russian Federation.*

*Received 16.05.2025, Revised 25.05.2025, Accepted 27.01.2026*

**Abstract:** The Sochi Arboretum is located at absolute altitudes of 8–140 m and includes the Lower Park on a low and flat marine terrace and the Upper Park comprising areas of weakly inclined Neogene terraces and steep slopes, which determines the differences in degradation trends: water logging of eluvial-surface-gley zheltsozems in the Lower park, and erosion-colluvial processes in zheltsozems and grey-humus soils in the Upper park. Both degradation types

are not strongly pronounced. The increasing water logging is manifested in the increasing gleyzation and surface water stagnation owing to the breakdown of the drainage system. In the Upper park, water logging is local and confined to small depressions, and the main types of degradation are removal of soil upper layers (erosion) and landslides, especially noticeable on a very steep slope under the natural forest. One more degradation process is the recreational compaction of small paths. The properties of zheltozems are favorable for the development of degradation processes, these are: heavy texture, high density and massive fabric of poorly permeable subsoils, participation of smectite in the clay fraction, as well as landscape features: steep slopes and abundant rainfall.

**Keywords:** forest park landscape; zheltozems (Haplic Alisols); eluvial-gley zheltozems (Albic Stagnic Alisols); water logging; artificial drainage; erosion; landslides; soil compaction.

## ВВЕДЕНИЕ

Деградация почв является одной из ключевых экологических проблем, как для природных, так и для урбанизированных территорий. Изменение свойств почв в результате деградационных процессов приводит к нарушению механизмов реализации почвами их экологических функций (Добровольский, Никитин, 1986), ограничивает биоразнообразие, устойчивость экосистем к изменениям климата, снижает рекреационный потенциал парковых ландшафтов, создавая дополнительные трудности в поддержании их эстетической привлекательности и в сохранении зеленых насаждений. Особую актуальность исследование процессов деградации приобретает на территории парка “Дендрарий” города Сочи (далее – Дендрарий), где в условиях высокой антропогенной нагрузки и нередких опасных природных явлений формируются уникальные псевдоприродные лесопарковые экосистемы с единственными в России желтоземами.

Дендрарий расположен в центре города Сочи на древних морских террасах. В 1892 г. публицистом и искусствоведом С.Н. Худековым была создана усадьба “Надежда” с коллекцией субтропических растений, которая в 1922 г. была преобразована в научно-исследовательскую организацию. В настоящее время Дендрарий является не только зоной активной рекреации (до 6 000 чел./день (<https://sochi.ru/>)), но и местом сохранения ценных

видов растений и редких почв. Однако усиление антропогенного воздействия в последние годы в виде роста числа посетителей и строительства многоэтажных зданий вплотную к границам Дендрария не могло не сказаться на квазиприродных лесопарковых ландшафтах Дендрария, состоящего из Верхнего и Нижнего парков, где развиваются, соответственно, эрозионные процессы и переувлажнение. Им способствуют природные особенности Дендрария: влажнотропический климат (осадки > 1 500 мм/год, среднегодовая температура +14.1 °С), затопление ливневыми осадками и водами поверхностного стока весной – ранним летом. В Верхнем парке к этому добавляются крутые склоны, глинистый элювий аргиллитов и желтоцветный глинистый делювий, периодические крупные оползни; в Нижнем парке – ровная поверхность Новочерноморской низкой морской террасы и исходная заболоченность. Высокая активность гипергенных процессов в Дендрарии иллюстрируется данными И.А. Гурова по биологической активности и миграциям ила в почвах (Гуров, 2010).

Деятельность научных сотрудников Дендрария направлена на поддержание лесопарковых ландшафтов и сохранение уникальных почв. Однако созданию эффективной системы управления территорией необходим мониторинг состояния почвенного покрова с учетом факторов деградации.

В рамках исследований, проведенных сотрудниками географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова на территории Дендрария в 2004–2010 гг., была составлена детальная почвенная карта, карты опасности переувлажнения, установлен ряд закономерностей почвообразования в желтоземах. Желтоземы и родственные им почвы в районе Сочи обладают особыми генетическими характеристиками, связанными с их положением на северной границе влажных субтропиков (Герасимова и др., 2010). Они приурочены к узкой приморской полосе не выше 200–300 м н. у. м., занимают всего 0.05% площади страны, и считаются некоторыми авторами “исчезающими”, в том числе в результате исключительно высокой рекреационной нагрузки. Почти весь ареал желтоземов в районе Сочи занят санаторно-курортными комплексами и жилыми домами с небольшими участками садов, парков и скверов (Захарихина, 2020).

Целью данной работы является оценка современного состояния почв в парке “Дендрарий” города Сочи и выявление факторов и проявлений деградации почв на основе полевых исследований и анализа материалов географического факультета МГУ, полученных в 2004–2010 гг. (Асадулина и др., 2008; Электронная ГИС, 2009; Гуров, 2011).

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Дендрарий находится в высотном интервале 8–140 м н. у. м., граница между Нижним и Верхним парками проходит на высоте 10–12 м (рис. 1). В геоморфологическом отношении территория включает: склон гряды Лысая гора (с серией древних морских террас); левый пологий склон долины ручья Гуипс; правый крутой склон долины речки Гнилушка крутизной 20–30 градусов.

Гряда сложена серыми и буровато-оливковыми тонкосланцеватыми карбонатными аргиллитами (20–25% карбонатов) с прослоями ржаво-бурого песчаника. Участки неогеновых аккумулятивных морских террас перекрыты желтоцветным глинистым делювием мощностью 3–7 м, к которому приурочены наиболее типичные профили желтоземов. В основании террас встречаются слои крупной гальки мощностью до 10 м, местами они подходят близко к поверхности. В центральной части Верхнего парка древние террасы и часть склонов Лысой горы перекрыты крупным оползнем (Инженерно-геологическая..., 1945).

Дендрарий расположен в области с максимальной в пределах России среднегодовой продолжительностью безморозного периода и среднегодовой температурой, по данным метеостанции “М-2 Сочи”. Средняя температура воздуха наиболее жаркого месяца – августа – +23.6 °С, наиболее холодного месяца – января – +6.1 °С. Средняя годовая температура поверхности почвы (для желтозема тяжелосуглинистого) составляет 15.9 °С с максимумом в июле (29.3 °С) и минимумом в январе (4.2 °С). Наибольшая глубина промерзания почвы – 4 см (в 1950 г.), средняя из максимальных глубин – 2 см. Средняя годовая влажность воздуха – 75%, а количество осадков – 1 633 мм с максимумом в декабре (190 мм) и минимумом в мае (99 мм) (Технический отчет..., 2022). Летом выпадают интенсивные и продолжительные ливни, что имеет значе-

ние для водно-эрозионных процессов и гидротермического режима почв.

На почвенной карте Дендрария показано около 30 различных вариантов почв, 20 из которых можно назвать условно природными (Электронная..., 2009; Гуров, 2011). Наиболее характерны желтоземы, в том числе элювиально-поверхностно-глеевые, и дерновые (серогумусовые) почвы; желтоземы занимают порядка 21% всей территории парка, а дерновые – 51%. Долины ручьев заняты аллювиальными почвами тяжелого гранулометрического состава, переувлажненными, но не всегда глеевыми. Почти все почвы Дендрария в разной степени изменены деятельностью человека, есть также локусы специфических фитогенных и орнитогенных почв, соответственно, под бамбуком и в птичьих вольерах. Значительное влияние на почвы отмечено вблизи построек, дорог и бетонно-асфальтовых дорожек, в районе свалки, а также участков благоустройства с “новыми” почвами.

Лабораторные анализы (табл. 1) проведены в аккредитованной лаборатории Испытательного лабораторного центра ФГБНУ ФИЦ “Почвенный институт имени В.В. Докучаева” согласно утвержденным методикам: рН (H<sub>2</sub>O) – ГОСТ 26423-85, рН (HCl) – ГОСТ 26483, содержание углерода (гумус методом Тюринга, %) – ГОСТ 26213, обменный (подвижный) Al – по методу ЦИНАО, мг/100 г почвы – ГОСТ 26485-85, гранулометрический состав – пипеточным методом согласно ГОСТ 12536-2014.

Определение плотности было выполнено буром Качинского (объемом 98.17 см<sup>3</sup>) по генетическим горизонтам почв и на тропичной сети, в результаты введена поправка на влажность.

Картографический материал и база ГИС созданы с помощью программного пакета QGIS 3.28.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Согласно рекогносцировочным обследованиям и информации, любезно предоставленной сотрудниками Дендрария, основными факторами деградационных процессов в почвах на территории парка являются: крутизна склонов, определяющая эрозию почв в Верхнем парке, местами в сочетании с оползневыми явлениями, подтопление, а также рекреационная активность, проявля-

ющаяся в вытаптывании незаасфальтированных поверхностей и замусоривании дорожек и куртин. Для оценки возможных изменений проводились маршрутные наблюдения и заложение почвенных разрезов в таких “горячих точках”; результаты сравнивались с материалами географического факультета МГУ за 2004–2010 гг.

Наиболее распространенными и идентифицируемыми среди деградационных явлений оказались склоновые процессы в Верхнем парке и процессы переувлажнения в Нижнем парке.

### ***Склоновые процессы***

Склоновые процессы проявляются локально в Верхнем парке на склонах Лысой горы и в долине ручьев Гуипс, Малый и реки Гнилушка (рис. 1). Свойства почв и пород – желтоземов и желтоцветного делювия благоприятны для их развития, однако они искусственно ограничены различными сооружениями типа подпорных стенок, рациональным размещением интродуцентов, поддержанием искусственных газонов (из паспалума) на крутых склонах. В центральной части Верхнего парка сконцентрированы архитектурные сооружения: фонтаны, лестницы, площадки, павильоны. Тем не менее в отдельных местах можно наблюдать проявления смыва и аккумуляции перемещенного материала. Одним из примеров слабого проявления склоновых процессов может быть пара разрезов 2007 г. и 2024 г. в центральной (самой благополучной в отношении эрозионного контроля) части парка в 60 м к юго-западу от виллы “Надежда” под чилийскими араукариями старше 60–80 лет. Разрез 2007 г. представляет центральный образ желтозема на желтоцветном глинистом делювии (Гуров, 2009; 2011; Герасимова и др., 2010; Ромашкевич, 1979). Разрезы заложены на расстоянии приблизительно 5 м друг от друга (рис. 2). Приведем описание разреза 2024 г. (разрез 7-24)<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Индексы горизонтов даны по Классификации почв России, 2004.

**Таблица 1.** Результаты лабораторных анализов почвенных образцов  
**Table 1.** Results of laboratory analyses of soil samples

Глубина, см	Разрез	Горизонт	pH <sub>водн.</sub>	pH <sub>сол.</sub>	Массовая доля органического вещества (по Тюри-ну), %	Обмен-ный (по-движный) алюми-ний, ммоль/100 г	Содержа-ние физи-ческой глины, <0.01мм, %	Плотность, г/см <sup>3</sup>
Разрез 1. Желтозем элювиально-поверхностно-глеевый суглинисто-глинистый на желтоцветном делювии								
0–5	1	AΥrz	5.3	4.8	5.6	<	60.47	0.92
5–20	1	AΥ/EL	5.4	3.9	2.32	0.621	64.44	1.16
20–45	1	Elnn	5.3	4.1	1.86	0.493	45.29	1.44
45–55	1	BMg	5.4	3.7	0.63	0.756	64.22	1.51
Разрез 2. Желтозем элювиально-поверхностно-глеевый суглинисто-глинистый (дренированный) на желтоцветном делювии								
0–30	2	AΥrz - AΥ	4.6	3.9	5.44	0.686	54.55	1.16
30–50	2	AΥ/ELtur	6.3	4.6	1.21	0.077	58.14	1.53
50–100	2	BM	4.5	3.6	0.79	0.726	65.56	1.5

**Продолжение таблицы 1**  
**Table 1 continued**

Глубина, см	Разрез	Горизонт	pH <sub>водн.</sub>	pH <sub>сол.</sub>	Массовая доля органического вещества (по Тюри- ну), %	Обмен- ный (по- движный) алюми- ний, ммоль/ 100 г	Содержа- ние физи- ческой глины, <0.01мм, %	Плотность, г/см <sup>3</sup>
Разрез 3. Серогумусовая остаточно-карбонатная глееватая глинисто-иллювирированная тяжелосуглинистая на насыпном грунте								
0–6	3	AΥrz	6.5	-	7.75	<	22.91	0.75
7–20	3	AΥca	7.4	7	4.34	<	39.26	1.33
25–45	3	BСt,ca,g	8.3	7.2	2.98	<	40.39	1.55
Разрез 4. Желтозем элювиально-поверхностно-глеевый тяжелосуглинистый водонасыщенный на желтоцветном делювии								
0–10	4	AΥrz	6.3	5.6	5.92	<	37.82	0.98
30–40	4	BM1	7	6.1	1.01	<	49.13	1.49
70–80	4	BM2g	6.8	4.5	0.76	0.05	76.8	1.48
Разрез 6. Серогумусовая маломощная пылевато-легкосуглинистая переуплотненная на антропогенном грунте								
5–31	6		6.9	5.3	2.49	<	44.84	1.44

**Продолжение таблицы 1**  
**Table 1 continued**

Глубина, см	Разрез	Горизонт	pH <sub>водн.</sub>	pH <sub>сол.</sub>	Массовая доля органического вещества (по Тюри- ну), %	Обмен- ный (по- движный) алюми- ний, ммоль/ 100 г	Содержа- ние физи- ческой глины, <0.01мм, %	Плотность, г/см <sup>3</sup>
Разрез 7. Желтозем конкреционный (сегрегационно-отбеленный) суглинисто-глинистый на желтоцветном делювии								
0–10	7	AУ	5.5	4.7	5.36	0.006	37.66	1.28
окт.30	7	AУ/BELnn	6.9	5.2	2.07	<	45.66	1.59
30–45	7	BELnn	6.8	5.4	0.93	<	70.1	1.56
Разрез 8. Серогумусовая стратифицированная глинистая остаточно-карбонатная на делювиальных отложениях								
0–10	8	Ayrz	5.8	4.9	5.11	<	40.38	1.35
10–40	8	Rb	6.3	4.4	1.95	0.06	64.68	1.56
40–60	8	C1ca	7.4	5.8	1.12	<	56.86	1.5
Разрез 9. Урбостратозем пылевато-суглинистый на техногенном материале								
0–11	9	AУ	5	4.5	7.19	<	29.38	1.39
11–33	9	C1	7.2	5.7	3.26	<	23.01	1.62

**Продолжение таблицы 1**  
**Table 1 continued**

Глубина, см	Разрез	Горизонт	pH <sub>водн.</sub>	pH <sub>сол.</sub>	Массовая доля органического вещества (по Тюри- ну), %	Обмен- ный (по- движный) алюмини- ний, ммоль/ 100 г	Содержа- ние физи- ческой глины, <0.01мм, %	Плотность, г/см <sup>3</sup>
Разрез 10. Стратозем гумусово-перегнойный глееватый остаточно-карбонатный глубоковскипающий суглинистый на карбонатных аргиллитах								
20–30	10	RCg	8.1	7.3	4.62	<	60.06	-
Разрез 11. Стратозем глееватый остаточно-карбонатный глубоковскипающий урбистратифицированный на карбонатных аргиллитах								
10–20	11	Rur	8.6	7.2	3.57	<	58.67	-
Образцы, отобранные с поверхности почвы (0–5 см)								
0–5	Бамбук		6.3	5.6	7.03	<	35.23	1.15
0–5	Секвойя		6.9	5.9	7.11	<	51.46	1.35





**Рис. 2.** Слева – Разрез 5-07; справа – Разрез 7-24.  
**Fig. 2.** Left: soil profile 5-07. Right: soil profile 7-24.

AY, 0–10 (13) см. Буровато-темно-серый (10YR3/3), средний ближе к тяжелому суглинок, ореховато-комковатый, копролиты, плотный. Скопления корней. Единично нодули: черные, диаметром около 1 см. Встречаются по всему профилю, кроме горизонта BM. Нодули черные, крупные (4 см), черные с ржавой каемкой. Единично мелкие камни и галька (до 5 см), мелкие обломки кирпича. Переход ясный по цвету, граница клиновидно-волнистая.

AY/BELnn, (13) –30 см. Палево-серый (10YR5/3), неоднородный, влажный, тяжелый суглинок, неясно комковатый. Немного живых корней, есть разложившиеся корни, копролиты. Много крупных нодулей, выветрелые обломки аргиллитов. Переход постепенный по цвету.

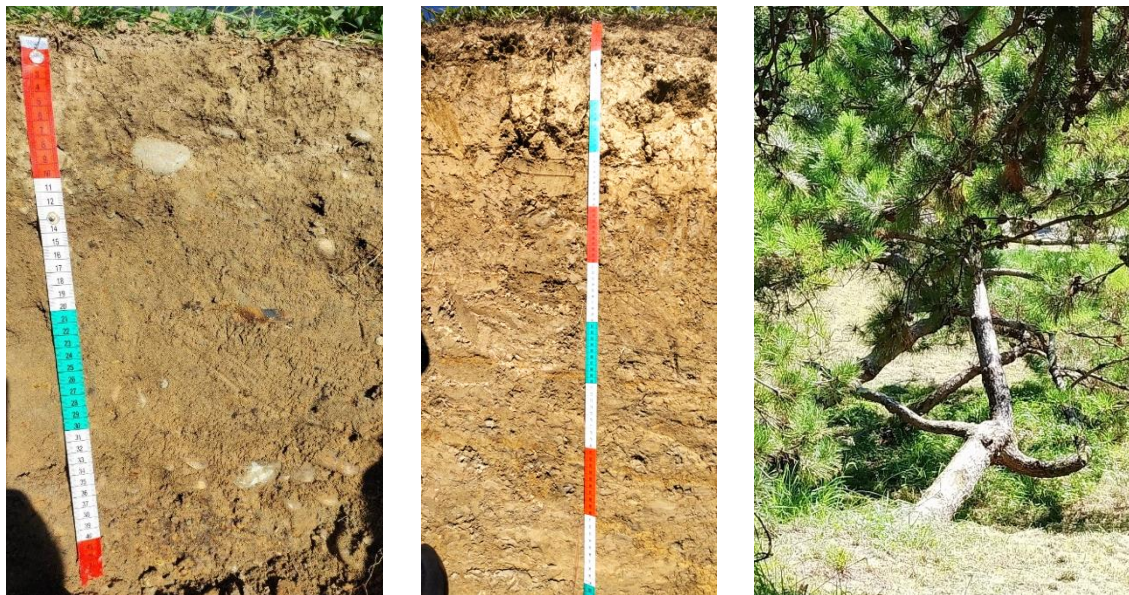
BE<sub>Lnn</sub>, 30–45 см. Палевый, мелкопятнистый: охристо-ржавый (10YR5/8) и палевый (2.5 YR 6/2), влажный, тяжелосуглинистый, угловато-комковатый, плотный, вязкий. Гравий, в том числе, обломки кирпича, копролиты, редкие мелкие слаборазложившиеся корни. Переход ясный по цвету (появляется желтизна и слабая мраморовидность).

BM<sub>1</sub>, 45–75 см. Окраска неоднородная: охристо-желтый (10YR5/8 и 2.5Y6/2), мраморовидный, умеренно-контрастный. Влажный, очень плотный, глинистый.

По аналитическим свойствам разрезы почти не различаются (табл. 1). Значения рН<sub>водн.</sub> колеблются от 5.4 до 6.8, более высокие – в новом разрезе, как и содержание гумуса: на глубине 0–10 и 15–25 см оно составляет 4.3–1.8 и 5.4–2.1% соответственно.

Морфологические различия между разрезами более заметны. В разрезе 7-24 больше мощность горизонта АУ и выраженность горизонта BE<sub>Lnn</sub> при его большей насыщенности нодулями, в горизонте BM слабее мраморовидность и желтая окраска. Можно предположить немного более контрастные условия увлажнения разреза 7-24 по более активной сегрегации соединений железа в нодули и осветления горизонта BE<sub>Lnn</sub>; нельзя исключить и слабый намыв, судя по различиям в облике гумусового горизонта. Однако оба явления выражены слабо.

Локальные склоновые процессы – плоскостной смыв, возможно, в сочетании с оползневыми, и аккумуляции делювия иллюстрируются парой разрезов № 9 и № 8, расположенных на ровной спланированной поверхности террасы и в нижней части находящегося под ней склона. Разрез на террасе заложен на искусственно выровненном участке (рис. 3). Профиль состоит из нескольких слоев: 0–12 см, 12–38 см (до слоя гальки), содержит включения гальки и артефакты; почва определена как серогумусовая суглинистая на природно-техногенной породе. Это молодая почва искусственного газона на перемешанном субстрате с повышенным содержанием гумуса (удобрения) и различиями в величинах рН: 5.0 и 7.2 в пределах верхних 40 см.



**Рис. 3.** Слева – дерновая (серогумусовая) на техногенных отложениях (разрез № 9); в середине – дерновая (серогумусовая) стратифицированная остаточно-карбонатная на делювиальных отложениях (разрез № 8); справа – кривые стволы сосен на мелких оползнях вблизи разреза № 8.

**Fig. 3.** Soddy (grey-humus) soil on technogenic deposits (Profile No. 9); in the center: stratified soddy (grey-humus) residual-calcareous soil on colluvial deposits (Profile No. 8); on the right: curved pine trunks on small landslides near Profile No. 8.

В разрезе в нижней части склона также выделяется несколько слоев. С глубины 70 см прослеживается отчетливая слоистость, параллельная склону (делювий); слой 20–50 см отличается массивным сложением и очень высокой плотностью, в его верхней части заметны трещины, верхние 10–12 см представляют горизонт АУ. Трещины прослеживаются и на поверхности, они являются результатом позднелетнего иссушения желтоземов, и их образование связано с участием смектитов в составе их глинистого материала (Чижикова, Гулов, 2012).

Физические свойства желтоземов не являются непосредственной причиной развития оползневых процессов, но они создают для них благоприятные условия. Как было показано исследованиями сотрудников географического факультета МГУ и подтверждено нами проведенными наблюдениями, для желтоземов характерно резкое увеличение содержания физической глины и илистой фракции в горизонте ВМ на глубине около полуметра. Благодаря большому количеству атмосферных осадков этот горизонт в течение почти всего года водонасыщен, он имеет массивное сложение, в нем практически не выражена структура, и проникновение влаги через него осуществляется преимущественно по ходам корней. В таком состоянии горизонт оказывается не только водоупором, но и слоем “скольжения” на склонах, и по нему происходит сползание массы верхних почвенных горизонтов.

Совершенно особые склоновые процессы наблюдаются на крутом (20–40°) восточном склоне Лысой горы, где местами сохранились естественные широколиственные леса с участием бука, граба, бука (редко – сосны) с густым кустарниковым ярусом и почти голой поверхностью почвы. На склон постоянно сбрасывается всевозможный мусор, как повсеместно, так и по крупным ложбинам. Поверхность склона исключительно неровная, местами ступенчатая за счет террасовидных оплывин, мелких эрозионных промоин, вывалов старых деревьев. В верхней и средней частях склона имеются крупные ложбины, нижние части которых заполнены суглинистым делювием с артефактами. Нижняя часть крутого склона представляет собой мощную намытую толщу, “упирающуюся” в забор Дендрария.

Почвенный покров склона состоит из смытых и намывных (стратифицированных) дерновых почв. В верхней и средней части склона образуются дерновые маломощные щебнистые почвы на карбонатных аргиллитах, в то время как у подножия, а также в ложбинах, в результате постоянной аккумуляции материала формируются серогумусовые стратифицированные почвы и стратоземы. Некоторые из них могут быть названы урбостратоземами, поскольку по всему профилю (до глубины 120 см) встречаются артефакты, включая строительный мусор, и обломки выветрелых аргиллитов.

Почвы слабощелочные (рН 8.1–8.6), вскипание в средней части профиля, в урбостратоземе ложбины есть признаки оглеения (рис. 4). Развитие эрозии определяется следующим сочетанием факторов: большая крутизна склона, отсутствие травяного яруса, поверхностная корневая система большинства деревьев, подстиление полуметрового мелкоземистого слоя делювия выветривающимися карбонатными аргиллитами.

На восточном склоне Лысой горы были обнаружены и другие проявления эрозионно-аккумулятивных явлений. В его нижней части в 35 м к югу от научно-исследовательского корпуса (рис. 1) на верхней относительно пологой поверхности склона под смешанным лесом был описан разрез серогумусовой пылевато-легкосуглинистой почвы мощностью 0.5 м на слое желтоцветного делювия, перекрывающим погребенную гумусированную почву на суглинках с галькой (№ 6). Ниже разреза до забора Дендрария находится короткий склон крутизной не более 10°, с неровной бугристой поверхностью, ямами вывалов деревьев, сильно нарушенный строительными и другими работами. Таким образом, крутизна и протяженность восточного склона уменьшаются с севера на юг; соответственно, уменьшаются масштабы проявлений современных склоновых процессов.

### ***Переувлажнение почв***

Подтопление территорий наиболее интенсивно проявляется в Нижнем парке, расположенном на Новочерноморской морской террасе, сложенной глинистыми отложениями и периодически затопляемой водами поверхностного стока. На террасе имеется

пруд с болотными почвами на его окраине и участки заболоченных почв. Искусственный дренаж в виде бетонных лотков, заглубленных на 10–15 см и разгружающихся в коллекторы, был сооружен в 1890–1910-х и реконструирован в 1940-х годах. К настоящему времени он утерял свою эффективность: частично разрушился и/или забит листьями и мелкоземом (рис. 5). Большая часть таких поверхностных дрен находится в западной части Нижнего парка.



**Рис. 4.** Урбостратозем глееватый, остаточно-карбонатный на карбонатных аргиллитах в ложбине в вершинной части восточного склона Лысой горы (разрез №10).

**Fig. 4.** Gleyic Residual-Calcareous Urbic Technosol on calcareous argillites in a hollow on the summit part of the eastern slope of Lysaya Mountain (Profile No. 10)



**Рис. 5.** Забитые мусором дренажи: слева – в Нижнем парке, справа – в Верхнем парке.

**Fig. 5.** Drains blocked with plant remains: left – in the Lower Park, right – in the Upper Park.

В почвенном покрове Нижнего парка под смешанными лесами, представленными преимущественно интродуцированными видами: магнолии, криптомерии, глицинии, а также клены, дубы, сосны и др., преобладают желтоземы элювиально-поверхностно-глеевые (рис. 6). Кроме литолого-геоморфологических факторов, оглеению способствуют вышеупомянутые физические свойства желтоземов. Содержание илистой фракции в верхней части профиля в два раза ниже, чем в горизонте ВМ, плотность которого колеблется около  $1.5 \text{ г/см}^3$  (табл. 2).

Приведем описание разреза (№ 1, рис. 6) желтозема элювиально-поверхностно-глеевого на желтоцветном делювии.

АУ, 0–5 см. Буровато-темно-серый 10YR 3/3, влажный, зернисто-комковатый, пылеватый средний суглинок, слабо уплотненный, много мелких копролитов (2–5 мм), редкие Fe-Mn нодулы, единичные тонкие черные мягкие пластинки по всему профилю (возможно, кора сосны), среднее количество мелких корней трав и горизонтальные древесные корни около 2 см в диаметре,

мало мелких дождевых червей, встречаются роренштейны; граница ровная, переход ясный по цвету.



**Рис. 6.** Желтоземы элювиально-поверхностно-глеевые на желтоцветном делювии; слева – разрез № 1, дренаж нарушен; справа – разрез № 2 на пологом склоне, дренаж частично сохранился.

**Fig. 6.** Eluvial-surface-gley zheltozems (Albic Stagnic Alisols) on yellow-colored colluvium; left – Profile No. 1 (drainage impaired); right – Profile No. 2 on a gentle slope (drainage partially preserved).

AY/EL, 5–20 см. Буровато-серый 10YR 5/3, влажный, зернисто-комковатый, структура выражена лучше, чем в предыдущем; средний к тяжелому суглинок, уплотненный, копролитов больше, чем в предыдущем, среднее количество мелких Fe-Mn нодулей. Мало мелких корней трав, отдельные крупные корни; граница ровная, переход постепенный по цвету.

ELnn, 20–40(45) см. На светло-сером фоне с бурым оттенком 10YR 5/4 – черные размытые Fe-Mn пятна-стяжения, влажнее и плотнее предыдущего, зернисто-комковатый, тяжелый суглинок, много плотных Fe-Mn нодулей (1.5–3 см, рис. 7) ржавого цвета снаружи и иссиня-черных внутри, единичные валуны и обломки породы до 10 см, редкие живые корни трав, мелкие тонкие коричневатые-черные сгнившие корни; граница слабоволнистая, переход ясный по цвету и нодулям.

BMg, 40–60/67 см. Неоднородная окраска: чередование белесых и охристо-буро-рыжих пятен: 10 YR 7/4 – белесый, 10 YR 6/8 – рыжий, сырой, слабо оструктуренный, глыбистый с угловатостью, глинистый, плотный, единичные Fe-Mn нодули, много тонких и средних неразложившихся коричневых корней, по ходам которых наблюдается осветление (слабая сизоватость), в нижней части горизонта начинается мраморовидность, переход постепенный по цвету.

BMg/CLM, 60–100 см. Неоднородная яркая окраска: 10 YR 6/6 – рыжий, 5Y 7/1 – сизый, 5Y 6/1 – сизые кутаны (трубки) толщиной около 3 мм по ходам корней (рис. 7). Неоднородная окраска: мраморовидность, чередование белесовато-сизых и охристых пятен, мокрый – сочится вода, массивный, глинистый, очень плотный.

На почвенной карте 2009 г. (Гуров, 2011; Электронная..., 2009) разрез № 2 находится в ареале желтоземов поверхностно-глеевых недренированных глинистых на желтоцветном делювии. Можно предположить, что последние 17 лет дренаж практически не функционирует, и ранее дренированные участки испытывают изменение гидрологического режима вплоть до застойного с яркими и своеобразными проявлениями оглеения, что видно на примере заложённых в 2024 г. двух разрезов.



**Рис. 7.** Проявления оглеения в разрезе № 1: слева – нодулы в горизонте BELnn, справа – глеевые глинистые трубки по ходу слабо разложившегося корня в нижней мраморовидной части горизонта BM.

**Fig. 7.** Signs of gleization in Profile No. 1: on the left – nodules in the BELnn horizon; on the right – gleyed clay tubes along a slightly decomposed root in the lower, “marbled” part of the BM horizon.

Помимо сравнения разновременных разрезов, косвенные признаки избытка влаги зафиксированы также в западной части Нижнего парка в ареале желтоземов элювиально-поверхностно-глеевых на слабонаклонной поверхности с густым покровом трав. Здесь несколько лет назад были произведены посадки деревьев, часть которых погибла, и на их месте образовались заполненные водой ямки глубиной 30–50 см. Почвенный разрез № 4 был заполнен водой в пределах первых 10 см.

Внешних признаков переувлажнения не было обнаружено в почвах газонов у скульптуры “Адам и Ева” (разрез № 3) и южнее на куртине с пальмами (разрез № 6); в обоих случаях были диагностированы серогумусовые почвы на насыпных субстратах.

В западной части Нижнего парка на пойме реки Гнилушки имеется куртина бамбука, созданная, по-видимому, с целью осушения. Почва под густыми зарослями бамбука отличалась исключительно высокой плотностью и сухостью, густой сетью корней в гумусовом горизонте, наличием трещин в горизонте BM (как в рассмотренном выше разрезе № 8). Участки с густыми зарослями бамбука, расположенные также в центральной части Нижнего парка, вероятно, выполняют функцию осушения.

В Верхнем парке посадки бамбука связаны с небольшими понижениями и долинами ручьев Малый и Гуипс. В отдельных участках в восточной части Дендрария проложены бетонные лотки, регулирующие сток со склонов (рис. 5); они, по-видимому, еще частично функционируют, однако местами были замечены нарушения в виде скоплений листьев и илистого материала в местах разгрузки лотков в коллекторы.

### ***Рекреационное воздействие – уплотнение почв***

На территории Дендрария расположены объекты капитального строительства, обеспечивающие административно-научную деятельность парка, постройки без фундамента, объекты рекреационного назначения и проложена сеть асфальтовых дорог и незапечатанных организованных троп. В процессе строительства, благоустройства и последующего рекреационного режима почвы были значительно нарушены: верхние горизонты перемешаны, перекрыты асфальтом (запечатаны), переуплотнены, загрязнены бытовым мусором.

Поскольку в Верхнем парке немало крутых склонов, посетители с целью сокращения пути по асфальтовому серпантину или из желания двигаться по индивидуальному маршруту, выходят за пределы организованной тропиной сети, создавая хаотичные тропы, где в результате происходит переуплотнение почв. В результате переуплотнения и нарушения естественного дренажа размывается верхний гумусовый горизонт.

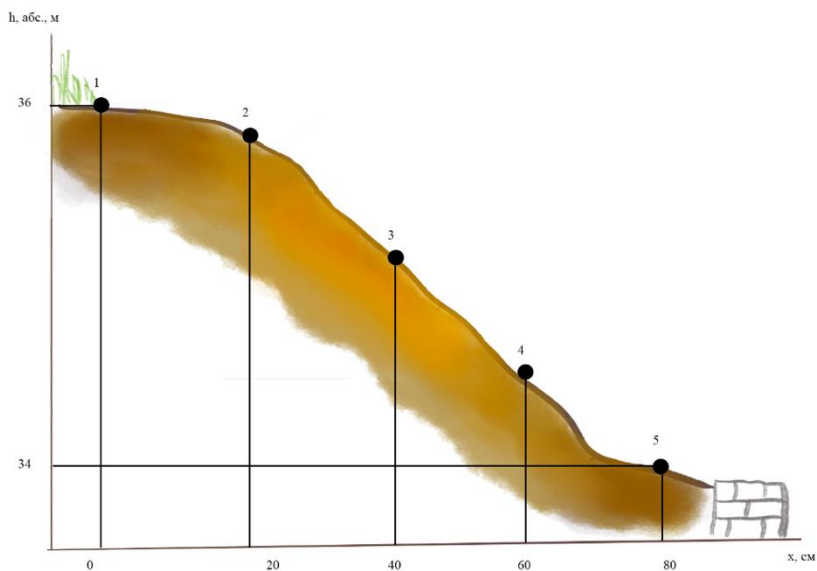
Нарушения верхней части почвенных профилей тропиной сетью вызывает оголение корней деревьев, угнетение травянистой растительности, развитие эрозии и оползания участков склонов. Оптимальной плотностью почв для древесной растительности являются значения 1.0–1.35 г/см<sup>3</sup> для лиственных и 0.9–1.15 г/см<sup>3</sup> для хвойных пород; выпадение лесных видов трав происходит при плотности 1.2–1.3 г/см<sup>3</sup>, а сорные растения выдерживают плотность 1.5–1.7 г/см<sup>3</sup> (Оборин, 2010). При высоком уровне рекреационной нагрузки плотность поверхностных горизонтов (0–3 см) возрастает в 1.5–2.0 раза. Уплотнение почвенной массы способствует уменьшению порозности на 30–50% за счет сокращения макропор, и приводит к нарушению влаго- и воздухообмена, а

также угнетению развития корневой системы растений (Кузнецов, 2015).

Оценка рекреационного уплотнения проводилась на нескольких тропах с наиболее сильными нарушениями (рис. 8). Отбор образцов на тропе № 1 производился вдоль линии тропы в ареале желтоземов конкреционно-галечниковых глинистых на желтоцветном делювии с галькой. Образцы отбирались с интервалом 0.4 м при перепаде высот 1.5 м: точка № 1 – верх тропинки, точка № 5 – нижняя точка. Образцы отбирались в центральной части тропинки и параллельно на расстоянии метра от центра на “фоновой линии” вне тропы (табл. 2, рис. 9.).



**Рис. 8.** Пример эрозионно-тропиночной деградации (тропа № 1).  
**Fig. 8.** Example of trail-induced erosion degradation (Trail No. 1).



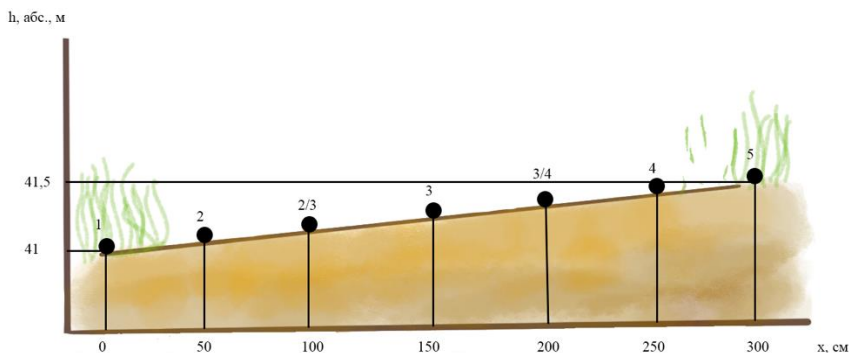
**Рис. 9.** Схема расположения точек на тропе № 1.  
**Fig. 9.** Location of sampling points on Trail No. 1

**Таблица 2.** Свойства почв слоя 0–5 см поверхностных образцов (0–5см) на тропе № 1

**Table 2.** Soil properties of the 0–5 cm surface layer, Trail No. 1

<b>Фон</b>					
<b>№№ точки</b>	<b>1–1</b>	<b>1–2</b>	<b>1–3</b>	<b>1–4</b>	<b>1–5</b>
<b>pH<sub>водн</sub></b>	5.6	4.6	6.8	6.8	6.3
<b>C<sub>орг</sub>, %</b>	6.96	6.25	11.33	11.09	6.34
<b>Плотность (ρ), г/см<sup>3</sup></b>	1.23	1.36	1.00	0.95	1.28
<b>Содержание физ. глины, %</b>	29.17	44.95	29.83	35.36	36.83
<b>Центр</b>					
<b>№№ точки</b>	<b>1–1</b>	<b>1–2</b>	<b>1–3</b>	<b>1–4</b>	<b>1–5</b>
<b>pH<sub>водн</sub></b>	5.9	6.5	4.6	6.6	6.5
<b>C<sub>орг</sub>, %</b>	11.38	6.11	3.46	11.38	9.28
<b>Плотность (ρ), г/см<sup>3</sup></b>	1.07	1.49	1.54	1.04	1.13
<b>Содержание физ. глины, %</b>	28.59	37.37	39.47	28.32	25.42

Отбор образцов на тропе № 2 (табл. 3, рис. 10) производился поперек тропы через каждые 20 см в ареале желтоземов маломощных глинистых, подстилаемых карбонатными аргиллитами. Уклон на тропе составляет 2–3°, где наивысшая точка – 1–5, находится вне тропы.



**Рис. 10.** Схема расположения точек на тропе № 2.

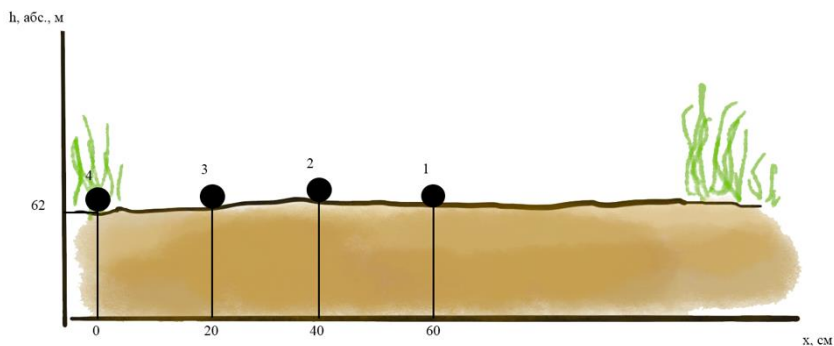
**Fig. 10.** Location of sampling points on Trail No. 2.

**Таблица 3.** Свойства почв поверхностных образцов (0–5 см) на тропе № 2

**Table 3.** Soil properties of the 0–5 cm surface layer, Trail No. 2

№ точки	тропа 2-1 (фон)	тропа 2-2	тропа 2-2/3	тропа 2-3 (центр)	тропа 2-3/4	тропа 2-4	тропа 2-5 (фон)
pH <sub>водн.</sub>	5.1	5.3	4.8	5.7	4.7	5.7	5.4
C <sub>орг</sub> , %	8.01	5.32	4.7	6.92	4.98	7.51	6.17
Плотность, г/см <sup>3</sup>	1.29	1.27	1.54	1.43	1.48	1.27	1.23
Содержание физ. глины, %	50.38	56.49	59.2	58.49	59.16	56.37	51.04

Отбор образцов на тропе № 3 (табл. 4, рис. 11) производился поперек тропы также в ареале желтоземов маломощных глинистых, подстилаемых карбонатными аргиллитами. Участок находится на ровной поверхности, образцы отбирались каждые 20 см так, что точка 3-1 соответствует центру тропы, а точка 3-4 отобрана на фоновом участке вне тропы.



**Рис. 114.** Схема расположения точек на тропе № 3.

**Fig. 11.** Location of sampling points on Trail No. 3.

**Таблица 4.** Свойства почв поверхностных образцов (0–5см) на тропе № 3

**Table 4.** Soil properties of the 0–5 cm surface layer, Trail No. 3

№ точки	тропа 3-1 (центр)	тропа 3-2	тропа 3-3	тропа 3-4 (фон)
$pH_{\text{водн}}$	5.8	5.4	5.9	5.5
$C_{\text{орг}}$ , %	5.96	6.73	7.47	7.46
Плотность, $г/см^3$	1.47	1.4	1.34	1.2
Содержание физ. глины, %	49.19	50.59	45.9	48.41

Плотность в образцах почв, отобранных в центральных частях дорожек, достигает  $1.54 \text{ г/см}^3$ , что сравнимо с плотностью образцов, отобранных в срединных глинистых горизонтах желтоземов (табл. 2). На самых плотных участках значительно уменьшается мощность гумусового горизонта, содержание  $C_{\text{орг}}$  понижено – 4.5–4.7% в сравнении с горизонтами АУ желтоземов, где содержание  $C_{\text{орг}}$  более 5%. На поверхность выходит желтоцветный глинистый делювий, который при высыхании имеет тенденцию к растрескиванию и образованию корок. Значения  $\text{pH}_{\text{водн}}$  уменьшаются на деградированных участках в сравнении с фоновыми, достигая величин 4.7–4.8, что может быть связано с выщелачиванием Са и Mg вследствие постоянных обильных осадков, а также с подкислением за счет опада хвойных деревьев, часто задерживающегося на тропях. Плотность образцов, отобранных в почве под кроной секвойи (*Sequoia sempervirens* (D. Don) Endl.) в Верхнем парке, составляет  $1.35 \text{ г/см}^3$ , что неблагоприятно для существования насаждений.

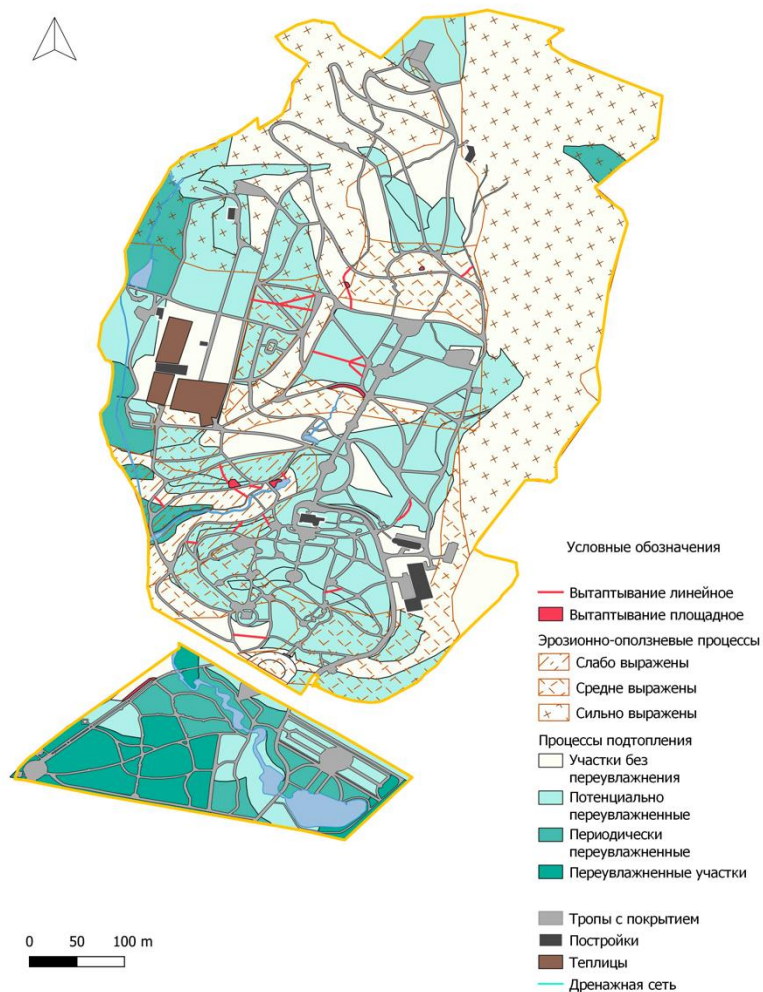
Учитывая меньшую устойчивость к деградации суглинистых и глинистых почв (Землянский, 2020), а также троп на склонах, развитие хаотичной тропиной сети может провоцировать усиление эрозии на переуплотненных участках в результате рекреационных нагрузок.

### ***Ареалы проявлений признаков деградации почв***

Составлена схема зон деградации почвенного покрова на территории Дендрария, дифференцированная по типам и интенсивности негативных процессов: переувлажнения, эрозионно-оползневых явлений и антропогенного воздействия (рис. 12).

Согласно полевому обследованию, в 2024 г. в Нижнем парке сильнее выражено переувлажнение почв в сравнении с 2009 г., а также более обширны зоны проявления склоновых процессов в Верхнем парке. Рекреационное воздействие, преимущественно вытаптывание и уплотнение открытой поверхности, отмечается в Верхнем парке в долине ручья Малый, а также в центральной части Верхнего парка. Риск переувлажнения минимален на склонах с близким залеганием карбонатных аргиллитов и песчаников; за-

стаивание влаги характерно для морских террас с выположенным рельефом, перекрытых глинистым желтоцветным делювием.



**Рис. 12.** Ареалы проявления признаков деградации почв в Верхнем и Нижнем парках Дендрария.

**Fig. 12.** Distribution of soil degradation features in the Upper and Lower Arboretum Parks.

На участках с посадками бамбука почвы оказываются очень сухими (осенью) и риск переувлажнения отсутствует. Интенсивность эрозионно-оползневых процессов напрямую зависит от крутизны склонов, однако в центральной части Верхнего парка в силу противоэрозионных и противооползневых мероприятий, проводимых сотрудниками Дендрария, склоновые процессы слабо выражены.

## ВЫВОДЫ

Деградационные явления в почвах Сочинского Дендрария не имеют широкого распространения, и они вызваны как изменениями природных условий, так и антропогенным фактором. Их набор и интенсивность проявления дифференцированы по частям Дендрария. В Верхнем парке отмечены отдельные небольшие участки с негативными явлениями на склонах с желтоземами и серогумусовыми почвами и обширный ареал природно-антропогенных нарушений на крутом восточном склоне с серогумусовыми маломощными (смытыми) почвами и урбостратоземами. Антропогенное воздействие в Верхнем парке оказывается комплексным, и оно проявляется на крутом восточном и относительно пологих западных склонах под деревьями и кустарниками со слабо развитым травяным ярусом и выражается в вытаптывании открытого почвенного покрова, локально провоцируя усиление эрозии.

В Нижнем парке имеет место усиление переувлажнения исходно влажных элювиально-поверхностно-глеевых желтоземов.

Опасность деградационных явлений в желтоземных почвах в значительной мере определяется их физическими свойствами, связанными с составом глинистых минералов и влажносубтропическим климатом, иногда с коротким сухим сезоном. Свойства срединного горизонта ВМ желтоземных почв: глинистый состав, высокая плотность, массивное сложение, низкая водопроницаемость могут быть причиной оползневых явлений и эрозии. В годы с засушливым летом в верхней части профиля образуются трещины, и почвенная масса становится очень твердой. Однако высокая интенсивность почвенных процессов восстанавливает природные свойства почв, сглаживая результаты антропогенного воздействия.

Слабокислая реакция и высокое содержание подвижного алюминия, как “классические” негативные свойства желтоземов, в почвах Дендрария не проявляются в основном благодаря участию в составе почвообразующих пород легко выветривающихся карбонатных аргиллитов или их обломков в желтоцветном делювии.

Сравнение с почвенной картой, составленной в 2010-е годы сотрудниками географического факультета МГУ, проведенное путем маршрутных наблюдений и анализа дистанционных материалов показали отсутствие существенных изменений в составе почвенного покрова. Почвы Нижнего парка сохраняют свое прежнее название с некоторым усилением глеевых признаков; в Верхнем парке отмечается более широкое распространение серогумусовых (дерновых) почв на склонах. Антропогенные насыпные почвы газонов и клумб существенно не изменяются.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Герасимова М.И., Колесникова Н.В., Асадулина Р.М., Гуров И.А. и др. Сочинский Дендрарий: опыт комплексного почвенно-геохимического исследования экологических проблем. Отчет Сочи, 2008. 94 с.
2. Герасимова М.И., Колесникова Н.В., Гуров И.А. Литолого-геоморфологические факторы формирования желтоземов и других почв во влажных субтропиках РФ (Сочинский дендрарий) // Вестник Моск. ун-та. Сер. 5, География. 2010. № 3. С. 61–65.
3. Гуров И.А. Кавказские желтоземы – сквозь призму времени // Вестник аграрной науки. Тбилиси, 2009. № 1. С. 27–32.
4. Гуров И.А. Целлюлозолитическая активность почв влажных субтропиков на примере Дендрария Сочи // Проблемы региональной экологии. 2010. № 2. С. 129–136.
5. Гуров И.А. Желтоземы древних морских террас в районе Сочи. Автореф. дисс. ... канд. с.-х. наук. М., 2011. 23 с.
6. Добровольский Г.В., Никитин Е.Д. Экологические функции почвы. М.: Изд-во МГУ, 1986. 136 с.
7. Захарихина Л.В., Буртовой А.В. Антропогенная эволюция желтоземов санаторной зоны г. Сочи // Почвоведение. 2020. № 6. С. 751–761.
8. Инженерно-геологическая карта Сочинского Дендрария. Масштаб 1 : 2 000. Ред. П.И. Ивченко / Леса СССР. Сочи, 1945.
9. Классификация и диагностика почв России. Смоленск. Ойкумена, 2004. 342 с.

10. Кузнецов В.А. Почвы и растительность парково-рекреационных ландшафтов Москвы: Дисс. ... канд. биол. наук. Москва, 2015.
11. Оборин М.С. Особенности анализа рекреационной и антропогенной нагрузки вследствие санаторно-курортной и туристской деятельности // Географический вестник. 2010. № 2. С. 19–24.
12. Почва, город, экология / под ред. акад. РАН Г.В. Добровольского. М., 1997. 320 с.
13. Ромашкевич А.И. Желтоземы СССР и их генетические особенности // Почвоведение. 1972. № 6. С. 3–17.
14. Технический отчет по результатам инженерно-геологических изысканий для подготовки проектной документации (91-ИИ/2022-ИГИ) “Индивидуальный жилой дом по адресу: г. Сочи, Центральный район, ул. Севастопольская 3/У 9Б с кадастровым участком №23:49:0205031:1991”. 2022. 64 с.
15. Краснодарский край. Статистический ежегодник. 2023: Стат. сб. / Краснодарстат. Краснодар, 2024. 279 с.
16. Чижикова Н.П., Гуров И.А. Минералогический состав элювиально-глеевых желтоземов (на примере почв Дендрария г. Сочи) // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2012. Вып. 69. С. 60–76. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2012-69-60-76>.
17. Экологическая емкость туристских территорий: подходы к оценке, индикаторы и алгоритмы расчета: коллективная монография / Д.Ю. Землянский, О.А. Климанова, О.А. Илларионова, Е.Ю. Колбовский. Всероссийская академия внешней торговли Минэкономразвития России. М.: ВАВТ, 2020. 102 с.
18. Шейн Е.В. Курс физики почв. М.: Изд-во МГУ, 2005. 432 с.
19. Электронная ГИС. Почвы Дендрария (с пояснительным текстом). М. 2009 / Герасимова М.И., Гуров И.А., Колесникова Н.В.
20. Официальный портал города-курорта Сочи. URL: <https://sochi.ru/press-sluzhba/novosti/69/173986>.
21. Справочник REST-сервисов ArcGIS. URL: [https://server.arcgisonline.com/ArcGIS/rest/services/World\\_Imagery](https://server.arcgisonline.com/ArcGIS/rest/services/World_Imagery).

## REFERENCES

1. Gerasimova M.I., Kolesnikova N.V., Asadulina R.M., Gurov I.A., et al., *Sochi arboretum: an experience of integrated soil-geochemical study of environmental problems*, Sochi Report, 2008, 94 p.
2. Gerasimova M.I., Kolesnikova N.V., Gurov I.A., Lithological and geomorphological factors of formation of zheltозems and other soils in the *Moscow University. Series 5, Geography*, 2010, No. 3, pp. 61–65.

3. Gurov I.A. Caucasian zheltozems – through the prism of time, *Bulletin of Agrarian Science*, Tbilisi, 2009, No. 1, pp. 27–32.
4. Gurov I.A., Cellulolytic activity of soils in the humid subtropics: the example of the Sochi Arboretum, *Problems of Regional Ecology*, 2010, No. 2, pp. 129–136.
5. Gurov I.A., *Zheltozemy drevnikh morskikh terras v rayone Sochi. Avtoref. diss. ... kand. s.-kh. nauk* (Yellow soils of ancient marine terraces in the Sochi region: Extended Abstract of Cand. Agri. Sci. thesis), Moscow, 2011, 23 p.
6. Dobrovolsky G.V., Nikitin E.D., *Ekologicheskiye funktsii pochvy* (Ecological functions of soil), Moscow: Moscow State University Press, 1986, 136 p.
7. Zakharikhina L.V., Burtovoy A.V., Antropogennaya evolyutsiya zheltozemov sanatornoy zony g. Sochi (Anthropogenic evolution of yellow soils in the Sochi sanatorium zone), *Pochvovedeniye*, 2020, No. 6, pp. 751–761.
8. Ivchenko P.I. (Ed.), Engineering-geological map of the Sochi Arboretum. Scale 1 : 2 000, Forests of the USSR, Sochi, 1945.
9. *Classification and diagnostics of soils of Russia*, Smolensk: Oikumena, 2004, 342 p.
10. Kuznetsov V.A., *Pochvy i rastitel'nost' parkovo-rekreatsionnykh landshaftov Moskvy: Diss. ... kand. biol. nauk* (Soils and vegetation of park and recreational landscapes of Moscow: Cand. Biol. Sci. thesis), Moscow, 2015.
11. Oborin M.S., Osobennosti analiza rekreatsionnoy i antropogennoy nagruzki vsledstviye sanatorno-kurortnoy i turistskoy deyatel'nosti (Features of the analysis of recreational and anthropogenic load due to health resort and tourist activities), *Geograficheskiy vestnik*, 2010, No. 2, pp. 19–24.
12. Dobrovolsky G.V. (Ed., Academician of the Russian Academy of Sciences), *Pochva, gorod, ekologiya* (Soil, city, ecology), Moscow, 1997, 320 p.
13. Romashkevich A.I., Zheltozemy SSSR i ikh geneticheskiye osobennosti (Yellow soils of the USSR and their genetic features), *Pochvovedeniye*, 1972, No. 6, pp. 3–17.
14. Technical report on the results of engineering and geological surveys for the preparation of design documentation (91-II/2022-IGI) “Individual Residential Building at the Address: Sochi, Central District, Sevastopolskaya St., Land Use Property 9B, with Cadastral Plot No. 23:49:0205031:1991.” 2022, 64 p.
15. Krasnodar Krai, Statistical Yearbook, 2023: Stat. Collection, Krasnodar: Krasnodarstat, 2024, 279 p.

16. Chizhikova N.P., Gurov I.A., Mineralogical composition of eluvial-gley zheltozems as exemplified by soils of the Arboretum in Sochi city, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2012, Vol. 69, pp. 60–76, DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2012-69-60-76>.
17. Zemlyanskiy D.Yu., Klimanova O.A., Illarionova O.A., Kolbovskiy E.Yu., *Ecological capacity of tourist areas: approaches to assessment, indicators, and calculation algorithms: a collective monograph*, All-Russian Foreign Trade Academy of the Ministry of Economic Development of the Russian Federation, Moscow: VAVT, 2020, 102 p.
18. Shein E.V., *Kurs fiziki pochv* (Soil Physics Course), Moscow: Moscow State University Press, 2005, 432 p.
19. Gerasimova M.I., Gurov I.A., Kolesnikova N.V., *Electronic GIS. Arboretum Soils* (with explanatory text), Moscow, 2009.
20. Official Portal of the Resort City of Sochi, URL: <https://sochi.ru/press-sluzhba/novosti/69/173986>.
21. ArcGIS REST Services Directory, URL: [https://server.arcgisonline.com/ArcGIS/rest/services/World\\_Imagery](https://server.arcgisonline.com/ArcGIS/rest/services/World_Imagery).

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2026-127-126-159



### **Ссылки для цитирования:**

Князева А.В., Лысак Л.В., Чепцов В.С., Александрова А.В. Бактериальные сообщества “подвешенных почв” заповедников Вьетнама // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2026. Вып. 127. С. 126-159. DOI: 10.19047/0136-1694-2026-127-126-159

### **Cite this article as:**

Kniazeva A.V., Lysak L.V., Cheptsov V.S., Aleksandrova A.V., Bacterial communities of “suspended soils” of Vietnam national reserves, Dokuchaev Soil Bulletin, 2026, V. 127, pp. 126-159, DOI: 10.19047/0136-1694-2026-127-126-159

### **Благодарность:**

Представленное исследование, в частности культивирование микроорганизмов и прямая микроскопия с применением люминесцентных красителей, проведено по Государственному заданию МГУ (№ 121040800174-6, № 121032300081-7). Часть работы выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Госзадание №FMRM-2026-0015). Также литературный обзор проведен в рамках Программы развития Междисциплинарной научно-образовательной школы МГУ имени М.В. Ломоносова “Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды”. Высокопроизводительное секвенирование проведено при частичной финансовой поддержке Программы НТР РФ “Анализ микробиомов растений и беспозвоночных животных экстремальных мест обитания с целью разработки штаммов-продуцентов новых метаболитов и ферментов” (договор № 075-15- 2021-1396).

Авторы статьи выражают огромную благодарность сотрудникам Российско-Вьетнамского Тропического центра и сотрудникам заповедников Вьетнама за всестороннюю помощь и поддержку при проведении полевых работ.

### **Acknowledgments:**

The presented study, in particular, the cultivation of microorganisms and direct microscopy using luminescent dyes, was carried out according to the State Assignment of Moscow State University (№ 121040800174-6, № 121032300081-7). Part of this work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, research topic № FMRM-2026-0015. The literary review was also conducted as part of the Program for the Development of the Interdisciplinary Scientific and Educational

School of Lomonosov Moscow State University “The Future of the planet and global Environmental Changes”. High-throughput sequencing was carried out with partial financial support from the NTR RF Program “Analysis of plant and Invertebrate Microbiomes in extreme habitats in order to develop strains producing new metabolites and enzymes” (agreement № 075-15- 2021-1396). The authors of the article express their deep gratitude to the staff of the Russian-Vietnamese Tropical Center and the staff of the Vietnam nature reserves for their comprehensive assistance and support in conducting field work.

## Бактериальные сообщества “подвешенных почв” заповедников Вьетнама

© 2026 г. А. В. Князева<sup>1,2\*</sup>, Л.В. Лысак<sup>1</sup>, В.С. Чепцов<sup>1</sup>,  
А.В. Александрова<sup>1,3</sup>

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

<sup>2</sup>Институт биохимии и физиологии микроорганизмов им. Г.К. Скрябина  
РАН, Россия, 142290, Московская обл., г. Пушкино, пр-т Науки, д.5.

<sup>3</sup>Совместный Российско-Вьетнамский Тропический научно-технический  
и технологический центр, Ханой, Вьетнам,

\*<https://orcid.org/0000-0002-9546-7046>, e-mail: [aknyazeva1999@gmail.com](mailto:aknyazeva1999@gmail.com).

Поступила в редакцию 12.05.2025, после доработки 29.08.2025,  
принята к публикации 27.01.2026

**Резюме:** Получена комплексная характеристика прокариотных сообществ “подвешенных почв (почвоподобных тел/солоидов)”, формирующихся в корзинах эпифитных папоротников (*Drynaria* sp. и *Asplenium* sp.) на территории заповедников Вьетнама (Пухоат, Контьбранг, Сонгтхань, Тэйзянг и Суанльен). Показатели общей численности бактерий (прямой микроскопический метод) варьировали от 1.5 до 5 млрд клеток / г субстрата, длина актиномицетного мицелия изменялась от 494 до 690 м/г субстрата. Среди культивируемых сапротрофных бактерий доминировали представители актиномицетов. По результатам метабаркодинга в сообществе доминировали филумы *Pseudomonadota*, *Actinomycetota* и *Acidobacteriota*. Ряд родов бактерий, выявленных методом баркодинга гена 16S рРНК, относился к типично почвенным бактериям, способным к деструкции сложных органических соединений. Максимальное родовое разнообразие было обнаружено среди представителей филума *Pseudomonadota*, среди родов филума

*Actinomycetota* наблюдалось меньшее разнообразие. Среди филума *Pseudomonadota* широко представлены роды бактерий, способные к активной фиксации атмосферного азота и синтезу биологически активных соединений. Полученный пул информации о разнообразии прокариотного микробиома “подвешенных почв” позволит сформировать представление о функционировании данного субстрата и указывает на высокий биотехнологический потенциал бактерий, обитающих в этом биотопе.

**Ключевые слова:** эпифитные папоротники; Вьетнам; прокариоты; микробное разнообразие; бактериальный метагеном.

## Bacterial communities of “suspended soils” of Vietnam national reserves

© 2026 A. V. Kniazeva<sup>1,2\*</sup>, L. V. Lysak<sup>1</sup>, V. S. Cheptsov<sup>1</sup>,  
A. V. Aleksandrova<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>*Lomonosov Moscow State University,  
1 Leninskie Gori, Moscow 119991, Russian Federation.*

<sup>2</sup>*Scriabin Institute of Biochemistry and Physiology of Microorganisms,  
Russian Academy of Sciences,  
5 Nauki Ave., Pushchino 142290, Moscow Region, Russian Federation.*

<sup>3</sup>*Joint Vietnam–Russia Tropical Science and Technology Research Center,  
44 Nguyen Van Huyen Str, Hanoi, Vietnam,*

\*<https://orcid.org/0000-0002-9546-7046>, e-mail: [aknyazeva1999@gmail.com](mailto:aknyazeva1999@gmail.com).

*Received 12.05.2025, Revised 29.08.2025, Accepted 27.01.2026*

**Abstract:** A comprehensive characteristic of prokaryotic communities of “suspended soils (soil-like bodies/solids)” formed in the roots of epiphytic ferns (*Drynaria* sp. and *Asplenium* sp.) in the territory of the Vietnamese nature reserves (Pu Hoat, Con Chu Rang, Song Thanh, Tay Giang and Xuan Lien) was obtained. The total number of bacteria (direct microscopic method) varied from 1.5 to 5 billion cells/g of substrate, the length of actinomycete mycelium varied from 494 to 690 m/g of substrate. Among the cultivated saprotrophic bacteria, representatives of actinomycetes dominated. According to the results of metabarcoding, the community was dominated by the phyla *Pseudomonadota*, *Actinomycetota* and *Acidobacteriota*. A number of bacterial genera identified by the 16S rRNA gene barcoding method belonged to typical soil bacteria capable of degrading complex organic compounds. The maximum generic diversity was found among representatives of the phylum

*Pseudomonadota*, while less diversity was observed among the genera of the phylum *Actinomycetota*. Among the phylum *Pseudomonadota*, bacterial genera capable of actively fixing atmospheric nitrogen and synthesizing biologically active compounds are widely represented. The obtained pool of information on the diversity of the prokaryotic microbiome of “suspended soils” will allow us to form an idea of the functioning of this substrate and indicates a high biotechnological potential of the bacteria living in this biotope.

**Keywords:** epiphytic ferns; Vietnam; prokaryotes; microbial diversity; bacterial metagenome.

## ВВЕДЕНИЕ

В XXI в. в связи с увеличивающимся воздействием антропогенных факторов на окружающую среду изучение микробных сообществ почв стало предметом широкого научного интереса. Особое внимание уделяется исследованиям разнообразия и функциональной активности микроорганизмов в уникальных биотопах, к которым относят так называемые “подвешенные почвы”, формирующиеся в корзинках эпифитов на территории тропических лесов Южной Америки и Юго-Восточной Азии. Подвешенные почвы развиваются на древесном ярусе экосистем при участии эпифитов, задерживающих органические остатки и золотый мелкозем, именно здесь наиболее ярко проявляются биокосные взаимодействия (Горячкин, 2022). В качестве аналога термина “подвешенные почвы” используют такие термины, как почвоподобные тела или “солоиды”. Данный субстрат до последнего десятилетия являлся малоисследованным, в связи с этим в настоящее время появляются статьи, цель которых состоит в накоплении информации об их формировании и функционировании (Еськов и др., 2017; Donald et al., 2020). Однако полное описание микробного разнообразия “подвешенных почв” ранее представлено не было. В данной работе нами проведено исследование, направленное на формирование общего представления о микробном комплексе различных “подвешенных почв”, а также на поиск общих тенденций в формировании микробных сообществ субстратов, образующихся в результате подобных биокосных взаимодействий. Исследование выявляет общие закономерности и различия в структуре микроб-

ных сообществ “подвешенных почв” разных заповедников, что способствует развитию сравнительной микробной экологии и пониманию влияния абиотических факторов на формирование микробиомов.

Тропические леса Вьетнама характеризуются высоким биоразнообразием и широким спектром экологических ниш. “Подвешенные почвы” являются специфическим почвоподобным телом, формирующимся в условиях постоянно и переменно влажных тропических лесов и состоящим из органоминерального материала на корнях растений-эпифитов (орхидеи, папоротники), включающим в себя ризодепозиты эпифитов, растительный материал форофита, продукты жизнедеятельности макроорганизмов, главным образом, термитов (Еськов и др., 2017; Еськов и др., 2020). Ранее на примере анализа образца “подвешенной почвы” из корзинки папоротника *Asplenium* sp. на стволе дерева *Terminalia* sp. (Терминалия, сем. Комбретовые), произрастающего на аллювиальной бурой почве заповедника Пухоат, нами было показано, что они характеризуются высокой общей численностью и разнообразием культивируемых бактерий и широким филогенетическим разнообразием по сравнению с почвой и опадом (Князева и др., 2022).

Корневые экссудаты растения формируют более кислые условия среды в “подвешенных почвах” по сравнению с почвами, находящимися под растениями-форофитами. Известно, что содержание органического углерода в “подвешенных почвах” значительно превышает аналогичное в наземных почвах и составляет до 40-45% (Еськов и др., 2020; Князева и др., 2022). Минеральная составляющая субстрата формируется, предположительно, в основном за счет эолового переноса частиц почвы, а также транспорта частиц представителями фауны, обитающими в “подвешенной почве”.

В настоящей работе мы представляем характеристику прокариотных сообществ “подвешенных почв”, формирующихся в корзинках эпифитных папоротников *Drynaria* sp. и *Asplenium* sp., на территории заповедников Вьетнама (Пухоат, Контъяранг, Сонгтхань, Тэйзыанг и Суанльен), проведенную при помощи классических и современных методов микробиологических исследований. Нулевой гипотезой данного исследования является предпо-

ложение, что структура и таксономическое разнообразие прокариотных сообществ “подвешенных почв” различных заповедников Вьетнама не имеют статистически значимых различий и формируются по единым закономерностям, независимо от экологических условий и вида растения-эпифита.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Образцы отбирались на территории заповедников и национальных парков Контъяранг, Пухоат, Сонгтхань, Суанльен и Тэйзыанг в период с 2018 по 2022 год в ходе комплексной ботанико-зоологической экспедиции, организованной Тропическим центром (рис. 1).

Объектами исследования служили образцы “подвешенных почв” из корзинки эпифитных папоротников *Drynaria* sp. и *Asplenium* sp., произрастающих на стволах деревьев. Координаты точек отбора образцов представлены в таблице 1.

В исследованных экотопах особое внимание уделялось древесному ярусу, в рамках которого формируются “подвешенные почвы”. Так в полидоминантном лесу охраняемого леса Тэйзыанг доминантами являлись деревья *Fokienia hodginsii* (Dunn) A. Henry & H.H. Thomas (Cupressaceae, сем. Кипарисовые), а также древовидные папоротники *Cibotium* sp. (Cibotiaceae, сем. Циботиевые). Точка отбора проб в заповеднике Суанльен находилась в смешанном тропическом вечнозеленом лесу с преобладанием бамбука. Экотоп в природном заповеднике Контъяранг сопряжен с низкогорным широколиственным лесом с преобладанием в верхнем ярусе деревьев из семейств Sapotaceae, Myrthaceae, Lauraceae, Burseraceae, Fagaceae (сем. Сапотовые, Миртовые, Лавровые, Бурзеровые, Буковые). Доминантами древесного яруса заповедника Сонгтхань являлись деревья семейств Dilleniaceae, Anacardiaceae, Euphorbiaceae, Fagaceae (сем. Диллениевые, Анакардиевые, Молочайные, Буковые) в точке отбора, расположенной в смешанном лесу. Преобладанием растений семейств Dipterocarpaceae, Myrtaceae, Anacardiaceae, Euphorbiaceae, Fagaceae (семейства Диптерокарповые, Миртовые, Анакардиевые, Молочайные, Буковые) отличался экотоп горного широколиственного леса того же заповедника. Образцы в природном заповеднике Пухоат отбирались на

участке тропического долинного широколиственного полидоминантного высокоствольного леса с преобладанием деревьев *Terminalia* sp. (Терминалия, сем. Комбретовые), *Aglaia odorata* var. *gigantea* (Аглая душистая, сем. Мелиевые) со среднесложной вертикальной структурой на переувлажненных аллювиальных почвах на гранитах в долине реки Зут Суой.



**Рис. 1.** Географическое расположение исследуемых особо охраняемых природных территорий (ООПТ).

**Fig. 1.** Geographical location of the studied specially protected natural areas.

**Таблица 1.** Экотопы, рода ассоциированных растений-эпифитов, pH водной вытяжки и органического углерода (в %) в образцах “подвешенных почв”

**Table 1.** Ecotopes, genera of associated epiphyte plants, pH of aqueous extract and organic carbon (in %) in samples of “suspended soils”

Особо охраняемые природные территории	Экотоп (координаты; высота, м)	Растение-эпифит	pH H <sub>2</sub> O	C <sub>орг</sub> , %
Охраняемый лес Тэйзянг	Полидоминантный лес в истоке ручья (15.809190° с.ш., 107.321853° в.д., 1500 м)	<i>Drynaria</i> sp.	5.5±0.3	45.07±1.16
Природный заповедник Суанльен	Низкогорный нарушенный лес на склоне (19.981312° с.ш., 104.976562° в.д., 900 м)	<i>Drynaria</i> sp.	5.8±0.2	37.2±4.98
Природный заповедник Контъыранг	Низкогорный широколиственный лес (14.514043° с.ш., 108.571246° в.д., 1025 м)	<i>Asplenium</i> sp.	5.5±0.4	45.5 ± 0.9

**Продолжение таблицы 1**  
**Table 1 continued**

<b>Особо охраняемые природные территории</b>	<b>Экотоп (координаты; высота, м)</b>	<b>Растение-эпифит</b>	<b>pH H<sub>2</sub>O</b>	<b>C<sub>орг</sub>, %</b>
Природный заповедник Пухоат	Долинный широколиственный лес (19.762038° с.ш., 104.802386° в.д., 845 м)	<i>Asplenium</i> sp.	5.8 ±0.5	33.64±9.7
Природный заповедник Сонгтхань	Горный смешанный лес (15.57974° с.ш., 107.379022° в.д., 960 м)	<i>Asplenium</i> sp.	5.4±0.3	36.71±0.14
	Горный широколиственный лес (15.567724° с.ш., 107.385276° в.д., 1005 м)	<i>Asplenium</i> sp.	5.7±0.4	40.1±2.26

Образцы субстрата были отобраны в период с мая 2018 г. по июнь 2022 г., далее хранились в воздушно-сухом состоянии при комнатной температуре (20–22°C). Экспериментальные исследования проводились спустя 2–3 недели после каждого этапа отбора образцов. Образцы для исследований представляли собой навески “подвешенных почв” массой 1 г, отобранные из смешанного образца. В рамках данного исследования нами оценивались смешанные образцы “подвешенных почв”, в которых не отделялась ризосферная составляющая. Для каждого экотопа было отобрано по 3 независимых образца “подвешенных почв” (разные корзинки папоротников), которые затем объединялись в смешанный образец. В исследованных образцах были определены рН водной вытяжки по ГОСТ 26423-85 и процентное содержание органического углерода по ГОСТ 26213-91 с учетом поправки на влажность по ГОСТ 28268-89. Результаты представлены в таблице 1.

Определение общей численности бактерий и длины актиномицетного мицелия проводилось с помощью прямого люминесцентно-микроскопического метода с применением красителя акридина оранжевого. Подсчет клеток осуществляли с использованием люминесцентного микроскопа ZEISS Axioscope 2+. Расчеты численности бактерий и длины актиномицетного мицелия производился по общепринятым формулам (Методы..., 1991).

Определение численности комплекса культивируемых сапротрофных бактерий (СБК) проводили при помощи посева суспензии почвы на плотную питательную среду (глюкозо-пептонно-дрожжевая с нистатином) из трех разведений – 1 : 100, 1 : 1000, 1 : 10000 – в 3–5-кратной повторности для каждого разведения (Белов и др., 2020). На 7–10-е сутки культивирования при температуре 25 °С произведен учет численности бактерий, данный показатель выражали в количестве КОЕ в 1 г почвы.

В рамках определения филогенетической структуры прокариотного сообщества было проведено высокопроизводительное секвенирование четырех образцов “подвешенных почв” из заповедников Тэйзянг, Суаньлен, Пухоат и Контъыранг. Выделение ДНК из образцов производилось с помощью набора FastDNA Spin Kit for Soil (MP Bio, США) согласно рекомендациям производителя. Далее полученные препараты ДНК очищали с помощью набо-

ра Cleanup Mini (Евроген, Россия). Подготовка библиотеки для секвенирования проводилась в компании Novogene (Пекин, Китай) с праймерами 515F + 806R (Caropaso et al., 2011). Высокопроизводительное секвенирование проводилось в компании Novogene на платформе Illumina Miseq (2 × 250 п. о.). Полученные сиквенсы депонированы в GenBank под номером PRJNA1216429. Анализ данных высокопроизводительного секвенирования проведен с помощью пакета Mothur v. 1.44.3 (Schloss et al., 2009) по протоколу MiSeq SOP (URL: [https://mothur.org/wiki/miseq\\_sop/](https://mothur.org/wiki/miseq_sop/)) с выравниванием полученных последовательностей ДНК по базе SILVA SEED v132 и таксономической идентификацией по базе SILVA SSUr v138. Оценку разнообразия бактериальных сообществ исследованных субстратов производили с помощью индексов альфа-разнообразия, рассчитанных при объединении сиквенсов в ОТЕ с уровнем сходства 97%.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

**Общая численность бактерий, длина актиномицетного мицелия.** В рамках проведенного исследования было выявлено, что общая численность бактерий в образцах “подвешенной почвы” варьирует от 1.5 до 5 млрд клеток/г субстрата (табл. 2). Наибольшая численность бактерий была выявлена в образцах “подвешенных почв” в корзинках эпифитных папоротников *Asplenium* sp. из заповедника Сонгтхань и Конгыранг. Минимальная численность зафиксирована для образца “подвешенной почвы” с папоротника *Drynaria* sp. из заповедника Суанльен. Показатели общей численности бактерий в образцах “подвешенных почв”, сформированных в корзинке папоротника *Asplenium* sp., превышали таковые в субстрате из корзинки папоротника *Drynaria* sp., что, возможно, связано с различным химическим составом корневых экссудатов растений, что требует проведения дальнейших исследований.

Длина актиномицетного мицелия в образцах “подвешенных почв” из всех изученных заповедников варьировала от 494 до 690 м/г. Во всех исследованных образцах “подвешенной почвы” длина мицелия превышала таковую в образцах почвы и растительного опада в 1.2–1.5 раза, отобранных в заповедниках Вьет-

нама, что связано с более благоприятными условиями среды (рН, углерод органического вещества (табл. 1)) по сравнению с наземной почвой (Князева и др., 2022). Также полученные значения были сопоставимы или превышали данные по почвам умеренной климатической зоны (Головченко и др., 2023).

**Таблица 2.** Общая численность бактерий, длина актиномицетного мицелия, численность культивируемых сапротрофных бактерий (с указанием доверительного интервала) в образцах “подвешенной почвы”  
**Table 2.** The total number of bacteria, the length of actinomycete mycelium, the number of cultivated saprotrophic bacteria (with confidence interval) in the samples of “suspended soil”

Заповедник, субстрат	Общая численность бактерий, млрд кле- ток/г	Длина актино- мицетного мицелия, м/г	Численность СБК, млн КОЕ/г
Тэйзянг, <i>Drynaria</i> sp.	2.1±0.02	580±34	2.6±0.3
Суанльен, <i>Drynaria</i> sp.	1.5±0.1	494±20	11.4±0.1
Контъбранг, <i>Asplenium</i> sp.	4.4±0.2	680±34	9±0.6
Пухоат, <i>Asplenium</i> sp.	2.6±0.1	580±18	1.2±0.5
Сонгтхань, <i>Asplenium</i> sp., смешанный лес	5±0.1	690±45	0.1±0.01
Сонгтхань, <i>Asplenium</i> sp., широколиственный лес	2.2±0.1	590±23	23.2±1.1

**Численность комплекса культивируемых сапротрофных бактерий.** Результаты посева на плотную питательную среду показали, что численность культивируемых бактерий в образцах “подвешенных почв” варьировала от 0.1 до 23.2 млн КОЕ/г субстрата (табл. 2). Наибольший разброс показателей был приурочен к образцам из природного заповедника Сонгтхань – максимальные значения были обнаружены в “подвешенных почвах”, сопряженных с горными ферраллитными почвами, тогда как минимальные – с темно-гумусовой ферраллитной. Численность культивируемых бактерий в “подвешенной почве” превышала таковую в образцах почвы в 1.5 раза и была несколько ниже или сравнима с образцами растительного опада (Князева и др., 2022). Также не было обнаружено значимого влияния типа растения-эпифита на численность СБК, однако, предположительно, на данный показатель влияло количество доступного органического вещества.

Характерной особенностью исследованных “подвешенных почв” было преобладание актиномицетов, что ранее отмечалось рядом авторов при исследовании наземных аллювиальных бурых почв заповедников Вьетнама (Dorchenkova et al., 2022). Нами для “подвешенных почв” были получены аналогичные результаты – большую долю СБК (до 40% от общей численности) составляли актиномицеты.

**Филогенетическая характеристика прокариотного сообщества (баркодинг гена 16S рРНК).** Во всех изученных образцах “подвешенных почв” заповедников Вьетнама доминирующими филумами являлись *Actinomycetota* и *Pseudomonadota* (рис. 1). Ранее близкие результаты были получены другими исследователями (Donald et al., 2020; Eskov et al., 2021), поэтому нас интересовало, сохраняются ли полученные закономерности для других “подвешенных почв”.

Филум *Pseudomonadota* был наиболее широко представлен во всех исследованных образцах, его относительное обилие превышало 30% от общего числа определенных последовательностей.

Заповедник/Филум	Тэйзынг	Суаньен	Контъяранг	Пухоат
<i>Acidobacteriota</i>	20.9	7.5	0.7	20
<i>Actinomycetota</i>	27.5	27.8	38	12
<i>Armatimonadota</i>	0.8	0.6		0.1
<i>Bacillota</i>	0.7	2.7	8	0.8
<i>Bacteroidota</i>	0.7	5.8	2	6
<i>Bdellovibrionota</i>	0.5	0.5		
<i>Chlorobiota</i>				0.3
<i>Chloroflexota</i>	2.4	3.6	0.7	4
<i>Cyanobacteriota</i>	0.1	0.2	0.7	0.5
<i>Deinococcota</i>		0.1		
<i>Desulfobacterota</i>	0.1	0.1		
<i>Fibrobacterota</i>	0.1	0.1		0.1
<i>Gemmatimonadota</i>	0.1	0.9		2
<i>Mycococcota</i>	0.9	3.6		
<i>NB1-j</i>		0.1		
<i>Nitrospirota</i>		0.4		0.9
<i>Planctomycetota</i>	7.9	4.5		0.3
<i>Pseudomonadota</i>	33.4	37.5	51	50
<i>Spirochaetota</i>		0.1		0.1
<i>Verrucomicrobiota</i>	1.9	2.5		3
<i>Abditibacteriota</i>	0.1	0.1		
<i>Dependentiae</i>	0.1	0.1		0.1
<i>Elusimicrobiota</i>	0.1	0.2		0.3
<i>Entotheonellaeota</i>		0.1		
<i>Eremiobacterota</i>	0.6	0.1		
<i>FCPU426</i>		0.1		0.1
<i>Hydrogenedentota</i>		0.1		
<i>Latescibacterota</i>		0.1		0.1
<i>MBNT15</i>		0.1		
<i>Patescibacteria</i>	0.1	0.8		
<i>RCP2-54</i>	0.9	0.1		
<i>Saccharibacteria</i>				0.1
<i>Sumerlaeota</i>		0.1		
<i>Tectomicrobia</i>		0.1		0.1

Относительное обилие, %
более 10%
5-10%
1-5%
менее 1%
н.о. или менее 0.01%

**Рис. 2.** Тепловая карта (heatmap) распределения филумов бактерий в изученных образцах “подвешенных почв”. Цифры на диаграмме обозначают % от общего количества последовательностей в библиотеке из каждой пробы. Жирным шрифтом обозначены филумы-кандидаты.

**Fig. 2.** Heatmap of bacterial phylum distribution in the studied “suspended soil” samples. Numbers in the diagram represent % of the total number of sequences in the library from each sample. Candidate phyla are shown in bold.

Относительное обилие филума *Actinomycetota* варьировало от 12% до 38%, максимальная представленность была обнаружена в образце из заповедника Контъыранг, минимальная – в образце из заповедника Пухоат. Относительное обилие представителей данного филума в “подвешенных почвах” из заповедников Тэйзянг и Суанльен было близко и составляло 27.5% и 27.8% соответственно. Вероятно, полученные данные связаны с различиями во влажности и содержании органического углерода в изученных субстратах (табл. 1). В ходе исследования было показано, что филум *Acidobacteriota* занимал различные позиции в перечне общего микробного разнообразия – в образцах “подвешенных почв” из заповедников Суанльен и Контъыранг содержание этого филума составляло 7.5% и 0.7% соответственно, тогда как для заповедников Тэйзянг и Пухоат – более 20%. Значимый вклад в формирование бактериального сообщества в “подвешенных почвах” вносили представители филумов *Bacillota*, *Bacteroidota*, *Chloroflexota*, *Verrucomicrobiota*. Наиболее высоким разнообразием на уровне филумов отличался образец “подвешенной почвы” из заповедника Суанльен (32 филума), наиболее низким – из заповедника Контъыранг (7 филумов с долей более 0.1%). Общими для всех исследованных образцов “подвешенных почв” были обнаруженные филумы *Acidobacteriota*, *Actinomycetota*, *Bacillota*, *Bacteroidota*, *Chloroflexota*, *Cyanobacteriota*, *Pseudomonadota*. Также в образцах “подвешенных почв” заповедников Тэйзянг и Суанльен были обнаружены общие филумы *Bdellovibrionota*, *Desulfobacterota*, *Abditibacteriota*, *Eremiobacterota*, *Patescibacteria*, *RCP2-54*, что, вероятно, указывает на общность условий, сформированных в “подвешенных почвах” из разных заповедников с одним формирующим растением-эпифитом. Помимо широко распространенных в наземных природных местообитаниях филумов бактерий (*Chloroflexota*, *Verrucomicrobiota*, *Bacteroidota*, *Gemmatimonadota*), практически во всех исследованных образцах “подвешенных почв” было обнаружено большое количество филумов-кандидатов, в частности, филумы *Elusimicrobiota* и *Dependentiae* (заповедники Тэйзянг, Суанльен и Пухоат).

Рассмотрим разнообразие микроорганизмов в наиболее представленных филумах на родовом уровне (табл. 3).

Филум *Pseudomonadota* был наиболее широко представлен практически во всех исследованных образцах. Среди представителей филума в “подвешенных почвах”, в основном, были выявлены рода типично почвенных бактерий – *Phenylobacterium*, *Reyranella*, *Bradyrhizobium*, *Pseudolabris*, *Dokdonella* – способных к деструкции широкого спектра ксенобиотиков (род *Phenylobacterium* (Eberspächer, Lingens, 2006)) и природных органических (рода *Sphingomonas*, *Novosphingobium*) соединений (Бабошин, Головлева, 2012). Собственно, типично почвенные виды и являются общими для всех изученных образцов (рода *Acidibacter*, *Reyranella*). Многие представители данных родов хорошо приспособлены к условиям тропических почв – кислой среде, периодам повышенной влажности и ограниченной доступности питательных веществ.

Среди представителей филума *Actinomycetota* в образцах “подвешенной почвы”, отобранной в охраняемом лесу Тэйзянг, заповедниках Суанльен и Контъыранг, были выявлены роды бактерий, активно участвующих в процессе деструкции широкого спектра органических соединений, в том числе ксенобиотиков: *Conexibacter* (Monciardini et al., 2003), *Mycobacterium* (Hennessee et al., 2009; Walsh et al., 2019), *Actinospica* (Cavaletti et al., 2006), а также представители филума *Acidobacteriota* – рода *Terracidiphilus* (García-Fraile et al., 2016), *Granulicella* (Pankratov, Dedysh, 2010). Эти организмы, с одной стороны, за счет высокой гидролитической активности формируют условия, способствующие существованию других организмов, а с другой стороны, поддерживают круговорот углерода в рамках отдельной открытой системы. Также в изученных образцах присутствуют представители родов бактерий, активно участвующие в процессах трансформации азота (азотфиксации, нитрификации и денитрификации) – *Conexibacter* (Monciardini et al., 2003), *Bryobacter* (Kulichevskaya et al., 2010), *Candidatus Solibacter* (Challacombe et al., 2011), *Rhodanobacter* (Green et al., 2012) и др.

**Таблица 3.** Доминантные роды филумов *Pseudomonadota*, *Actinomycetota* и *Acidobacteriota* в образцах “подвешенных почв” заповедников Вьетнама

**Table 3.** Dominant genera of *Pseudomonadota*, *Actinomycetota* and *Acidobacteriota* phyla in samples of “suspended soils” in Vietnam nature reserves

Филум/ заповедник	Тэйзянг	Суанльен	Контгыранг	Пухоат
<i>Pseudomonadota</i>	<i>Roseiarcus</i> , <i>Acidibacter</i> , <i>Phenylobacterium</i> , <i>Reyranella</i>	<i>Acinetobacter</i> , <i>Acidibacter</i> , <i>Bradyrhizobium</i> , <i>Reyranella</i> , <i>Pseudolabrys</i> , <i>Rhodoplanes</i> , <i>Pseudomonas</i> , <i>Bauldia</i> , <i>Roseiarcus</i> , <i>Devosia</i> , <i>SWB02</i> , <i>Dongia</i> , <i>Phenylobacterium</i> , <i>Hirschia</i> , <i>Sphingomonas</i> , <i>Rhodanobacter</i> , <i>Labrys</i> , <i>Allorhizobium</i> - <i>Neorhizobium</i> - <i>Pararhizobium</i> - <i>Rhizobium</i> , <i>Hyphomicrobium</i> , <i>Dokdonella</i>	<i>Methylobacterium</i> , <i>Caulobacter</i> , <i>PMMR1</i> , <i>Bradyrhizobium</i> , <i>Acidibacter</i> , <i>Phenylobacterium</i> , <i>Pseudolabrys</i> , <i>Dongia</i> , <i>Novosphingobium</i> , <i>Acidibacter</i> , <i>Pseudomonas</i>	<i>Variibacter</i> , <i>Rhizomicrobium</i> , <i>Haliangium</i> , <i>Bradyrhizobium</i> , <i>Burkholderia</i>

**Продолжение таблицы 3**  
**Table 3 continued**

<b>Филум/ заповедник</b>	<b>Тэйзянг</b>	<b>Суанльен</b>	<b>Контъыранг</b>	<b>Пухоат</b>
Actinomycetota	<i>Conexibacter</i> , <i>Mycobacterium</i> , <i>Actinospica</i>	<i>Nocardioides</i> , <i>Streptomyces</i> , <i>Mycobacterium</i> , <i>Conexibacter</i> , <i>Solirubrobacter</i> , <i>Actinoplanes</i> , <i>Pseudonocardia</i> , <i>Jatrophihabitans</i> , <i>Gaiella</i> , <i>Kutzneria</i> , <i>Amycolatopsis</i> , <i>Marmoricola</i> , <i>Nakamurella</i> , CL500-29_marine_group, <i>Microbacterium</i>	<i>Actinoallomurus</i> , <i>Streptomyces</i> , <i>Amycolatopsis</i> , <i>Catellatospora</i> , <i>Actinospica</i> , <i>Gaiella</i> , <i>Conexibacter</i>	<i>Acidothermus</i> , <i>Jatrophihabitans</i> , <i>Actinomadura</i>

**Продолжение таблицы 3**  
**Table 3 continued**

<b>Филум/ заповедник</b>	<b>Тэйзянг</b>	<b>Суанльен</b>	<b>Контъыранг</b>	<b>Пухоат</b>
<i>Acidobacteriota</i>	<i>Bryobacter, Candidatus_Solibacter, Acidipila, Terracidiphilus, Granulicella, Candidatus_Koribacter, Edaphobacter, Occallatibacter, Acidicapsa</i>	<i>Bryobacter, Candidatus_Solibacter, Acidipila, Subgroup_10, Candidatus_Koribacter, RB41, Edaphobacter, Occallatibacter</i>	<i>Bryobacter, Candidatus Koribacter</i>	<i>Candidatus Solibacter, Bryobacter Granulicella</i>

Также значительный вклад в формирование “подвешенных почв” вносят мезо- и макроорганизмы, что отражает доминирование в филуме *Acidobacteriota* представителей рода *Edaphobacter* – типично почвенного рода бактерий, зачастую ассоциированного с местообитаниями термитов (Koch et al., 2008; Park, Yoon, 2013). Гипотезу об активном участии термитов в формировании “подвешенных почв” (Еськов и др., 2017) подтверждает присутствие в результатах метабаркодинга рода *Pseudonocardia* – экзосимбионта термитов (Gopikrishnan et al., 2023).

Многие бактерии, обнаруженные в исследованных субстратах, имеют специфические приспособления к переживанию условий повышенной инсоляции – содержат меланиноподобные пигменты, имеют плотную клеточную оболочку, образуют покоящиеся формы (например, рода *Solirubrobacter*, *Streptomyces*, *Nakamurella*) (Paudel et al., 2022). Значительная доля бактерий, выявленных в исследованных субстратах, в частности, принадлежащие к родам *Sphingomonas* (Cziborowski et al., 2020; Gulati, Ghosh, 2017), *Bradyrhizobium* (Pérez-Giménez et al., 2009; Rinaudi, Giordano, 2010), *Granulicella* (Pankratov, Dedysh, 2010), *Candidatus Solibacter* (Challacombe et al., 2011), способны формировать биопленки, что облегчает переживание стресса, обусловленного сезонным пересыханием. Многие представители родов *Occallatibacter*, *Acidicapsa*, относящиеся к типично почвенным бактериям, способны к образованию полисахаридных капсул, удерживающих влагу во время засушливого периода года (Kulichevskaya et al., 2012).

“Подвешенные почвы” частично формируются за счет переноса почвенных частиц, тем самым наследуя свойства наземных почв, располагающихся в непосредственной близости от эпифитного растения. Почвы тропического региона и, в частности, исследуемых заповедников Вьетнама, имеют кислую реакцию среды, низкое содержание органического углерода и высокое содержание железа (Нгуен Ван Тхинь, Околелова, 2017). В рамках метабаркодинга прокариотной составляющей “подвешенных почв” обнаружены широко представленные в почве ацидофильные бактерии – *Acidibacter* (Falagán, Johnson, 2014), *Mycobacterium* (Hennessee et al., 2009), *Actinospica*, *Acidipila* (Okamura et al., 2011),

*Terracidiphilus*, *Granulicella* (Панкратов, 2012)), также были выявлены представители филума *Pseudomonadota*, способные проводить процессы редукации железа (род *Acidibacter*) (Falagán, Johnson, 2014).

По сравнению с образцами “подвешенных почв” из охраняемого леса Тэйзянг, микробное разнообразие данного субстрата из заповедника Суанльен было выше за счет родового разнообразия представителей филума *Pseudomonadota*, здесь было обнаружено 153 рода бактерий, содержание 51 рода из которых было выше 0.1%. Значительная часть бактерий этого филума была связана с процессами деструкции органики за счет активного синтеза гидролаз (рода *Acinetobacter* (Jung, Park, 2015), *Devosia* (Zhang et al., 2024), *Dongia*, *Hirschia*, *Sphingomonas*, *Dokdonella*) и процессами цикла азота (рода *Rhodoplanes*, *Bauldia*, *Rhodanobacter*, *Huphromicrobium*, *Dokdonella* и др.). Во всех изученных образцах “подвешенной почвы” показатели родового разнообразия филума *Pseudomonadota* превышали полученные ранее для наземных почв заповедников Вьетнама (Князева и др., 2022; Чернов и др., 2019). Было выявлено большее количество родов бактерий, проводящих процессы симбиотической и свободной азотфиксации (рода *Bradyrhizobium*, *Devosia* (Zhang et al., 2024), *Labrys*). Также многие обнаруженные рода прокариот относятся к группе PGPB (plant growth promoting bacteria) (Cong et al., 2015; Prashar et al., 2013), способных к синтезу фитогормонов или других вторичных метаболитов, влияющих на рост растений, – представители родов *Caulobacter*, *Bradyrhizobium*, *Burkholderia* (Nievas et al., 2021).

Ряд родов бактерий, приуроченных к филумам *Pseudomonadota* и *Actinomycetota*, обнаруживаются практически во всех “подвешенных почвах” заповедников Вьетнама – роды *Bradyrhizobium*, *Phenylobacterium*, *Actinospica*, *Conexibacter*, и *Streptomyces* (заповедники Тэйзянг, Суанльен и Контъыранг). Данные роды бактерий типичны для кислых почв, обогащенных железом и сложно разлагаемым органическим веществом (Indrasumunar et al., 2012). Помимо этих родов в заповеднике Контъыранг были также обнаружены бактерии-деструкторы токсинов и сложных ароматических соединений – роды *Caulobacter* (Wilhelm, 2018), *Pseudolabrys*, *Novosphingobium*, *Catellatospora*). Наиболее низкое

разнообразие прокариот филумов *Pseudomonadota*, *Actinomycetota* и *Acidobacteriota* было приурочено к образцам “подвешенных почв” заповедника Пухоат.

Некоторые представители филума *Pseudomonadota* были обнаружены во всех изученных образцах, в частности роды, участвующие в цикле азота, тогда как пересечений по родам внутри филума *Actinomycetota* было значительно меньше. Примечательно, что представители филума *Acidobacteriota* практически не отличались во всех исследованных образцах “подвешенных почв”. Рода *Bryobacter*, *Terracidiphilus*, *Granulicella*, *Occallatibacter*, *Acidicapsa* вносят важный вклад в трансформацию органических соединений, при этом способны функционировать в условиях ограниченного питания и влажности “подвешенных почв”.

На основании данных, полученных путем высокопроизводительного секвенирования, были рассчитаны некоторые экологические показатели. Альфа-разнообразие исследованных образцов “подвешенных почв” оценивалось на основании расчетных индексов Шеннона и  $Chao1$  (табл. 4). Индекс Шеннона определяет разнообразие таксонов; индекс  $Chao1$  оценивает общее реальное количество таксонов, обнаруженных в данном субстрате (Меркель и др., 2019; Чернов и др., 2015, Chao, 1987, Magurran, 1988).

Наибольшее разнообразие (по индексу Шеннона) было обнаружено в образцах “подвешенной почвы” из заповедника Суанльен (7.74), наименьшее – приурочено к образцам из охраняемого леса Тэйзьянг (5.52). Большой разброс значений разнообразия был получен при помощи индекса  $Chao1$ , где предположительное реальное количество ОТЕ в сообществах “подвешенных почв” разных заповедников различалось в 1.5–3.3 раза. Альфа-разнообразие прокариотных сообществ, предположительно, связано с высотами точек отбора образцов над уровнем моря – так, в заповедниках, расположенных на средних высотах (Суанльен, Конгыранг) индексы Шеннона и  $Chao1$  в “подвешенных почвах” превышали аналогичные для заповедников, расположенных более низко или высоко (Пухоат и Тэйзьянг, соответственно).

**Таблица 4.** Экологические индексы альфа-разнообразия бактериального сообщества (Шеннон и Chaol) в исследованных образцах “подвешенных почв”

**Table 4.** Ecological indices of the alpha diversity of the bacterial community (Shannon and Chaol) in the studied samples of “suspended soils”

Заповедник	Chaol	Шеннон
Тэйзьянг, <i>Drynaria</i> sp.	3252.75	5.52
Суанльен, <i>Drynaria</i> sp.	6870.55	7.74
Контъыранг, <i>Asplenium</i> sp.	4016.58	6.98
Пухоат, <i>Asplenium</i> sp.	2075.7	6.76

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, общая численность бактерий в изученных образцах “подвешенных почв” из заповедников Вьетнама варьировала от 1.5 до 5 млрд клеток/г субстрата, была выше в корзинке папоротника *Asplenium* sp. и ниже в корзинке папоротника *Drynaria* sp. Длина актиномицетного мицелия изменялась от 494 до 690 м/г субстрата и не зависела от рода эпифитного папоротника. В комплексах сапротрофных культивируемых бактерий “подвешенных почв” доминировали представители актинобактерий (актиномицеты), что соотносится с высокой долей актиномицетов, определенных прямым методом, по сравнению с почвами Вьетнама и умеренной климатической зоны. Доминирующими филумами в “подвешенных почвах” заповедников Тэйзьянг, Суанльен, Контъыранг и Пухоат являются *Pseudomonadota*, *Actinomycetota* и *Acidobacteriota*, что подтверждает данные, полученные классическими методами, представленные в литературных источниках. Общие роды бактерий, обнаруженные в “подвешенных почвах”, преимущественно относились к типично почвенным, способным к

деструкции сложных органических соединений. Большинство представителей филума *Acidobacteriota* были обнаружены во всех образцах, тогда как среди родов филума *Actinomycetota* наблюдалось меньшее количество пересечений между заповедниками. Результаты изучения филогенетического разнообразия бактериального комплекса свидетельствуют в пользу значимого вклада и влияния эолового переноса частиц почвы, а также транспорта почвенных частиц представителями фауны на формирование “подвешенной почвы”, однако требуются дополнительные исследования для подтверждения этой гипотезы.

Накопленная информация о микробном разнообразии “подвешенных почв” позволит сформировать наиболее полное представление о функционировании прокариотных сообществ в исследованном биотопе. Полученные результаты о высоком разнообразии прокариотных сообществ подчеркивают важность охраны тропических лесов Вьетнама как резерватов уникальных микроорганизмов, что актуально в контексте глобальных изменений климата и антропогенного воздействия на природные экосистемы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бабошин М.А., Головлева Л.А.* Деградация полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) аэробными бактериями и ее кинетические аспекты // *Микробиология*. 2012. Т. 81. № 6. С. 695.
2. *Белов А.А., Чепцов В.С., Лысак Л.В.* Методы идентификации почвенных микроорганизмов. М.: МАКС Пресс, 2020. 196 с.
3. *Головченко А.В., Грачева Т.А., Семенова Т.А., Морозов А.А., Самигуллина С.Р., Глухова Т.В., Иншиева Л.И.* Мицелиальный компонент эуτροφных торфяных почв в зоне активной деструкции органического детрита // *Почвоведение*. 2023. Т. 5. С. 536–549. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0032180X22601232>.
4. *Горячкин С.В.* География экстремальных почв и почвоподобных систем // *Вестник Российской Академии Наук*. 2022. Т. 92. № 6. С. 564–571.
5. *Еськов А.К., Абакумов Е. В., Тиунов А.В.* Агеотропные воздушные корни-“улавливатели” гнездовых эпифитов и их роль в формировании подвешенных почв // *Журнал общей биологии*. 2017. Т. 78. № 3. С. 54–68.

6. Еськов А.К., Прилепский Н.Г., Антипина В.А. Формирование эпифитных сообществ в искусственных лесных посадках Южного Вьетнама // Экология. 2020. № 3. С. 171–180. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0367059720030075>.
7. Князева А.В., Лысак Л.В., Манучарова Н.А., Латыгина Е.В., Александрова А.В. Численность и таксономическое разнообразие прокариот аллювиальной бурой почвы и сопряженных субстратов (Вьетнам, заповедник Пухоат) // Почвоведение. 2022. № 10. С. 1290–1300. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0032180X22100070>.
8. Меркель А.Ю., Тарновецкий И.Ю., Подсокорская О.А., Тоцаков С.В. Анализ систем праймеров на ген 16S рРНК для профилирования термофильных микробных сообществ // Микробиология. 2019. Т. 88. № 6. С. 655–664. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0026365619060119>.
9. Методы почвенной микробиологии и биохимии / Под ред. Д.Г. Звягинцева. М.: Изд-во МГУ, 1991. 304 с.
10. Нгуен Ван Тхинь, Околелова А.А. Биоразнообразие и свойства почв биосферного заповедника Донг Най Южного Вьетнама. Волгоград: ВолгГТУ, 2017. 160 с.
11. Панкратов Т.А. Ацидобактерии в микробных сообществах болотных и тундровых лишайников // Микробиология. 2012. Т. 81. № 1. С. 56–63.
12. Чернов Т.И., Железова А.Д., Тхакахова А.К. Микробиомы целинных почв тропических лесов южного Вьетнама // Микробиология. 2019. Т. 88. № 4. С. 479–489. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0026365619040049>.
13. Чернов Т.И., Тхакахова А.К., Кутовая О.В. Оценка различных индексов разнообразия для характеристики почвенного прокариотного сообщества по данным метагеномного анализа // Почвоведение. 2015. С. 462–468. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0032180X15040036>.
14. Caporaso J.G., Lauber C.L., Walters W.A., Berg-Lyons D., Lozupone C.A., Turnbaugh P.J., Fierer N., Knight R. Global patterns of 16S rRNA diversity at a depth of millions of sequences per sample // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 2011. Vol. 108. P. 4516–4522. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1000080107>.
15. Cavaletti L., Monciardini P., Schumann P., Rohde M., Bamoto R., Busti E., Sosio M., Donadio S. *Actinospica robiniae* gen. nov., sp. nov. and *Actinospica acidiphila* sp. nov.: Proposal for Actinospicaceae fam. nov. and Catenulisporinae subord. nov. in the order Actinomycetales // International journal of systematic and evolutionary microbiology. 2006. Vol. 56. P. 1747–53. DOI: <https://doi.org/10.1099/ijs.0.63859-0>.
16. Challacombe J.F., Eichorst S.A., Hauser L., Land M., Xie G., Kuske C.R. Biological consequences of ancient gene acquisition and duplication in the

- large genome of *Candidatus Solibacter usitatus* Ellin6076 // PloS one. 2011. Vol. 6(9). DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0024882>.
17. Chao A. Estimating the Population Size for Capture-Recapture Data with Unequal Catchability // Biometrics. 1987. Vol. 43(4). P. 783–791. DOI: <https://doi.org/10.2307/2531532>.
18. Cong P., Dung D., Hien T., Hien N., Choudhury A., Kecskés M., Kennedy I. Inoculant plant growth-promoting microorganisms enhance utilisation of urea-N and grain yield of paddy rice in southern Vietnam // European Journal of Soil Biology. 2015. Vol. 45. P. 52–61. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2008.06.006>.
19. Czieborowski M., Hübenthal A., Poehlein A., Vogt I., Philipp B. Genetic and physiological analysis of biofilm formation on different plastic surfaces by *Sphingomonas* sp. strain S2M10 reveals an essential function of sphingan biosynthesis // Microbiology. 2020. Vol. 166(10) P. 918–935. DOI: <https://doi.org/10.1099/mic.0.000961>.
20. Donald J., Maxfield P., Leroy C., Ellwood M.D. Epiphytic suspended soils from Borneo and Amazonia differ in their microbial community composition // Acta Oecologica. 2020. Vol. 1. P. 106. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actao.2020.103586>.
21. Dorchenkova Y.A., Gracheva T.A., Babich T.L., Sokolova D.S., Alexandrova A.V., Pham G.T.H., Lysak L.V., Golovchenko A.V., Manucharova N.A. Soil Actinomycetes of Vietnam Tropical Forests // Forests. 2022. Vol. 13. P. 1–23. DOI: <https://doi.org/10.3390/f13111863>.
22. Eberspächer J., Lingens F. The Genus *Phenylobacterium* // The Prokaryotes. 2006. Vol. 5. P. 250–256. DOI: [https://doi.org/10.1007/0-387-30745-1\\_13](https://doi.org/10.1007/0-387-30745-1_13).
23. Eskov A.K., Zverev A.O., Abakumov E.V. Microbiomes in Suspended Soils of Vascular Epiphytes Differ from Terrestrial Soil Microbiomes and from Each Other // Microorganisms. 2021. Vol. 9. P. 1033. DOI: <https://doi.org/10.3390/microorganisms9051033>.
24. Falagán C., Johnson D.B. *Acidibacter ferrireducens* gen. nov., sp. nov.: an acidophilic ferric iron-reducing gammaproteobacterium // Extremophiles: life under extreme conditions. 2014. Vol. 18(6). P. 1067–1073. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00792-014-0684-3>.
25. García-Fraile P., Benada O., Cajthaml T., Baldrian P., Lladó S. *Terracidiphilus gabretensis* gen. nov., sp. nov., an Abundant and Active Forest Soil Acidobacterium Important in Organic Matter Transformation // Applied and environmental microbiology. 2016. Vol. 82(2). P. 560–569. DOI: <https://doi.org/10.1128/AEM.03353-15>.
26. Gopikrishnan V., Radhakrishnan M., Krupakar P., Manigundan K., Abirami B., Reshma S. Endosymbiotic interactions of actinobacteria with the

insects / Editor: Dharumadurai D. // Microbial Symbionts. Academic Press. 2023. P. 645–658. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99334-0.00001-3>.

27. Green S.J., Prakash O., Jasrotia P., Overholt W.A., Cardenas E., Hubbard D., Tiedje J.M., Watson D.B., Schadt C.W., Brooks S.C., Kostka J.E. Denitrifying bacteria from the genus *Rhodanobacter* dominate bacterial communities in the highly contaminated subsurface of a nuclear legacy waste site // Applied and environmental microbiology. 2012. Vol. 78(4). P. 1039–1047. DOI: <https://doi.org/10.1128/AEM.06435-11>.

28. Gulati P., Ghosh M. Biofilm forming ability of *Sphingomonas paucimobilis* isolated from community drinking water systems on plumbing materials used in water distribution // J Water Health. 2017. Vol. 15(6) P. 942–954. DOI: <https://doi.org/10.2166/wh.2017.294>.

29. Hennessee C.T., Seo J.S., Alvarez A.M., Li Q.X. Polycyclic aromatic hydrocarbon-degrading species isolated from Hawaiian soils: *Mycobacterium crocinum* sp. nov., *Mycobacterium pallens* sp. nov., *Mycobacterium rutilum* sp. nov., *Mycobacterium rufum* sp. nov. and *Mycobacterium aromaticivorans* sp. nov. // International journal of systematic and evolutionary microbiology. 2009. Vol. 59 (Pt. 2) P. 378–387. DOI: <https://doi.org/10.1099/ijs.0.65827-0>.

30. Indrasumunar A., Menzies N.W., Dart P.J. Laboratory prescreening of *Bradyrhizobium japonicum* for low pH, Al and Mn tolerance can be used to predict their survival in acid soils // Soil Biology and Biochemistry. 2012. Vol. 48. P. 135–141. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.01.019>.

31. Jung J., Park W. *Acinetobacter* species as model microorganisms in environmental microbiology: current state and perspectives // Applied microbiology and biotechnology. 2015. Vol. 99(6). P. 2533–2548. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00253-015-6439-y>.

32. Koch I.H., Gich F., Dunfield P.F., Overmann J. *Edaphobacter modestus* gen. nov., sp. nov., and *Edaphobacter aggregans* sp. nov., acidobacteria isolated from alpine and forest soils // International journal of systematic and evolutionary microbiology. 2008. Vol. 58 (Pt. 5). P. 1114–1122. DOI: <https://doi.org/10.1099/ijs.0.65303-0>.

33. Kulichevskaya I.S., Kostina L.A., Valášková V., Rijkstra W.I.C., Sinninghe Damsté J.S., de Boer W., Dedysh S.N. *Acidicapsa borealis* gen. nov., sp. nov. and *Acidicapsa ligni* sp. nov., subdivision 1 Acidobacteria from Sphagnum peat and decaying wood // International journal of systematic and evolutionary microbiology. 2012. Vol. 62 (Pt. 7). P. 1512–1520. DOI: <https://doi.org/10.1099/ijs.0.034819-0>.

34. Kulichevskaya I.S., Suzina N.E., Liesack W., Dedysh S.N. *Bryobacter aggregatus* gen. nov., sp. nov., a peat-inhabiting, aerobic chemo-organotroph from subdivision 3 of the Acidobacteria // International journal of systematic

and evolutionary microbiology. 2010. Vol. 60 (Pt. 2). P. 301–306. DOI: <https://doi.org/10.1099/ijs.0.013250-0>.

35. Magurran A.E. Ecological Diversity and Its Measurement // Springer Netherlands. 1988.

36. Monciardini P., Cavaletti L., Schumann P., Rohde M., Donadio S. *Conexibacter woesei* gen. nov., sp. nov., a novel representative of a deep evolutionary line of descent within the class Actinobacteria // International journal of systematic and evolutionary microbiology. 2003. Vol. 53 (Pt. 2). P. 569–576. DOI: <https://doi.org/10.1099/ijs.0.02400-0>.

37. Nievas F.L., Bogino P.C., Giordano W. Quorum sensing signaling molecules and their inhibitors in legume-associated bacteria / Editors: Singh V.P., Singh S., Tripathi D. K., Prasad S.M., Bhardwaj R., Chauhan D.K. In: Abiotic Stress and Legumes. Academic Press. 2021. P. 277–289. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815355-0.00014-X>.

38. Okamura K., Kawai A., Yamada T., Hiraishi A. *Acidipila rosea* gen. nov., sp. nov., an acidophilic chemoorganotrophic bacterium belonging to the phylum Acidobacteria // FEMS microbiology letters. 2011. Vol. 317 (2). P. 138–142. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1574-6968.2011.02224.x>.

39. Pankratov T. A., Dedysh S. N. *Granulicella paludicola* gen. nov., sp. nov., *Granulicella pectinivorans* sp. nov., *Granulicella aggregans* sp. nov. and *Granulicella rosea* sp. nov., acidophilic, polymer-degrading acidobacteria from Sphagnum peat bogs // International journal of systematic and evolutionary microbiology. 2010. Vol. 60 (Pt. 12). P. 2951–2959. DOI: <https://doi.org/10.1099/ijs.0.021824-0>.

40. Park S., Yoon J.H. *Hirschia litorea* sp. nov., isolated from seashore sediment, and emended description of the genus *Hirschia* // International journal of systematic and evolutionary microbiology. 2013. Vol. 63 (Pt. 5). P. 1684–1689. DOI: <https://doi.org/10.1099/ijs.0.044297-0>.

41. Paudel L., Ghimire N., Han S.R., Park H., Jung S.H., Oh T.J. Complete genome of *Nakamurella* sp. PAMC28650: genomic insights into its environmental adaptation and biotechnological potential // Functional & integrative genomics. 2022. Vol. 23 (1) P. 18. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10142-022-00937-6>.

42. Perez-Gimenez J., Mongiardini E.J., Althabegoiti M.J., Covelli J., Quelas J.I., Lopez-Garcia S.L., Lodeiro A.R. Soybean Lectin Enhances Biofilm Formation by *Bradyrhizobium japonicum* in the Absence of Plants // International Journal of Microbiology. 2009. Vol. 2009. P. 8. DOI: <https://doi.org/10.1155/2009/719367>.

43. Prashar P., Kapoor N., Sachdeva S. Rhizosphere: Its structure, bacterial diversity and significance // Reviews in Environmental Science and

- Biotechnology. 2013. Vol. 13. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11157-013-9317-z>.
44. Rinaudi L.V., Giordano W. An integrated view of biofilm formation in rhizobia // FEMS Microbiology Letters. 2010. Vol. 304. P. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1574-6968.2009.01840.x>.
45. Schloss P.D., Westcott S.L., Ryabin T., Hall J.R., Hartmann M., Hollister E.B., Lesniewski R.A., Oakley B.B., Parks D.H., Robinson C.J., Sahl J.W., Stres B., Thallinger G.G., Van Horn D.J., Weber C.F. Introducing mothur: open-source, platform-independent, community-supported software for describing and comparing microbial communities // Applied and environmental microbiology. 2009. Vol. 75 (23). P. 7537–7541. DOI: <https://doi.org/10.1128/AEM.01541-09>.
46. Walsh C.M., Gebert M.J., Delgado-Baquerizo M., Maestre F.T., Fierer N.A Global Survey of Mycobacterial Diversity in Soil // Applied and environmental microbiology. 2019. Vol. 85 (17). DOI: <https://doi.org/10.1128/AEM.01180-19>.
47. Wilhelm R.C. Following the terrestrial tracks of *Caulobacter* – redefining the ecology of a reputed aquatic oligotroph // The ISME journal. 2018. Vol. 12 (12). P. 3025–3037. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41396-018-0257-z>.
48. Zhang Y., Binbin Ouyang, Wenli Zhang, Cuie Guang, Wei Xu, Wanmeng Mu Deoxynivalenol: Occurrence, toxicity, and degradation // Food Control. 2024. Vol. 155. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2023.110027>.
49. MOTHUR. URL: [https://mothur.org/wiki/miseq\\_sop/](https://mothur.org/wiki/miseq_sop/).

## REFERENCES

1. Baboshin M. A., Golovleva L.A., Aerobic bacterial degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and its kinetic aspects, *Mikrobiologiya*, 2012, Vol. 81 (6), pp. 639–650, DOI: <https://doi.org/10.1134/S0026261712060021>.
2. Belov A.A., Cheptsov V.S., Lysak L.V., *Metody identifikatsii pochvennykh mikroorganizmov* (Methods of identification of soil microorganisms). Moscow: MAKS Press, 2020, 196 p.
3. Golovchenko A.V., Gracheva T.A., Semenova T.A., Morozov A.A., Samigullina S.R., Glukhova T.V., Inisheva L.I., Mitsel'ial'nyi komponent eutrofnyykh torfyanykh pochv v zone aktivnoi destruktzii organicheskogo detrita (Mycelial component of eutrophic peat soils in the zone of active destruction of organic detritus), *Pochvovedenie*, 2023, Vol. 5, pp. 536–549, DOI: <https://doi.org/10.31857/S0032180X22601232>.
4. Goryachkin S.V., Geografiya ekstremal'nykh pochv i pochvopodobnykh system (Geography of extreme soils and soil-like systems), *Vestnik Rossiiskoi*

*Akademii Nauk*, 2022, Vol. 92, No. 6, 5pp. 64–571.

5. Es'kov A.K., Abakumov E.V., Tiunov A.V., Ageotropnye vozdushnye korni-“ulavlivateli” gnezdovyykh epifitov i ikh rol' v formirovanii podveshennykh pochv (Ageotropic aerial roots-“catchers” of nesting epiphytes and their role in the formation of suspended soils), *Zhurnal obshchei biologii*, 2017, Vol. 78 (3), pp. 54–68.

6. Es'kov A.K., Prilepskii N.G., Antipina V.A., Formirovanie epifitnykh soobshchestv v iskusstvennykh lesnykh posadkakh Yuzhnogo V'etnama (Formation of epiphytic communities in artificial forest plantations of Southern Vietnam), *Ekologiya*, 2020, Vol. 3, pp. 171–180, DOI: <https://doi.org/10.31857/S0367059720030075>.

7. Kniazeva A.V., Lysak L.V., Manucharova N.A., Lapygina E.V., Aleksandrova A.V., Chislennost' i taksonomicheskoe raznoobrazie prokariot allyuvial'noi buroi pochvy i sopryazhennykh substratov (V'etnam, zapovednik Pukhoat) (Abundance and taxonomic diversity of prokaryotes in alluvial brown soil and associated substrates (Vietnam, Pukhoat Nature Reserve)), *Pochvovedenie*, 2022, Vol. 10, pp. 1290–1300, DOI: <https://doi.org/10.31857/S0032180X22100070>.

8. Merkel' A.Yu., Tarnovetskii I.Yu., Podosokorskaya O.A., Toshchakov S.V., Analiz sistem praimerov na gen 16S rRNK dlya profilirovaniya termofil'nykh mikrobnnykh soobshchestv (Analysis of primer systems for the 16S rRNA gene for profiling thermophilic microbial communities), *Mikrobiologiya*, 2019, Vol. 88 (6), pp. 655–664, DOI: <https://doi.org/10.1134/S0026365619060119>.

9. Zvyagintsev D.G., *Metody pochvennoi mikrobiologii i biokhimii* (Methods of soil microbiology and biochemistry), Moscow: Izd-vo MGU, 1991, 304 p.

10. Nguen Van Tkhin', Okolelova A.A., *Bioraznoobrazie i svoystva pochv biosfernogo zapovednika Dong Nai Yuzhnogo V'etnama* (Biodiversity and properties of soils in the Dong Nai Biosphere Reserve of Southern Vietnam), Volgograd: VolgGTU, 2017, 160 p.

11. Pankratov T.A., Acidobacteria in microbial communities of the bog and tundra lichens, *Microbiology*, 2012, Vol. 81, No. 1, pp. 51–58, DOI: <https://doi.org/10.1134/S0026261711060166>.

12. Chernov T.I., Zhelezova A.D., Tkhakakhova A.K., Mikrobiomy tselinnykh pochv tropicheskikh lesov yuzhnogo V'etnama (Microbiomes of virgin soils of tropical forests of Southern Vietnam), *Mikrobiologiya*, 2019, Vol. 88 (4), pp. 479–489, DOI: <https://doi.org/10.1134/S0026365619040049>.

13. Chernov T.I., Tkhakakhova A.K., Kutovaya O.V., Otsenka razlichnykh indeksov raznoobraziya dlya kharakteristiki pochvennogo prokariotnogo soobshchestva po dannym metagenomnogo analiza (Evaluation of various diversity indices for characterizing the soil prokaryotic community based on

metagenomic analysis), *Pochvovedenie*, 2015, pp. 462–468, DOI: <https://doi.org/10.7868/S0032180X15040036>.

14. Caporaso J.G., Lauber C.L., Walters W.A., Berg-Lyons D., Lozupone C.A., Turnbaugh P.J., Fierer N., Knight R., Global patterns of 16S rRNA diversity at a depth of millions of sequences per sample, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, Vol. 108, pp. 4516–4522, DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1000080107>.

15. Cavaletti L., Monciardini P., Schumann P., Rohde M., Bamonte R., Busti E., Sosio M., Donadio S., *Actinospica robiniae* gen. nov., sp. nov. and *Actinospica acidiphila* sp. nov.: Proposal for Actinospicaceae fam. nov. and Catenulisporinae subord. nov. in the order Actinomycetales, *International journal of systematic and evolutionary microbiology*, 2006, Vol. 56, pp. 1747–53, DOI: <https://doi.org/10.1099/ijs.0.63859-0>.

16. Challacombe J.F., Eichorst S.A., Hauser L., Land M., Xie G., Kuske C.R., Biological consequences of ancient gene acquisition and duplication in the large genome of *Candidatus Solibacter usitatus* Ellin6076, *PloS one*, 2011, Vol. 6 (9), DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0024882>.

17. Chao A., Estimating the Population Size for Capture-Recapture Data with Unequal Catchability, *Biometrics*, 1987, Vol. 43 (4), pp. 783–791, DOI: <https://doi.org/10.2307/2531532>.

18. Cong P., Dung D., Hien T., Hien N., Choudhury A., Kecskés M., Kennedy I., Inoculant plant growth-promoting microorganisms enhance utilisation of urea-N and grain yield of paddy rice in southern Vietnam, *European Journal of Soil Biology*, 2015, Vol. 45, pp. 52–61, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2008.06.006>.

19. Czieborowski M., Hübenthal A., Poehlein A., Vogt I., Philipp B., Genetic and physiological analysis of biofilm formation on different plastic surfaces by *Sphingomonas* sp. strain S2M10 reveals an essential function of sphingan biosynthesis, *Microbiology*, 2020, Vol. 166 (10), pp. 918–935, DOI: <https://doi.org/10.1099/mic.0.000961>.

20. Donald J., Maxfield P., Leroy C., Ellwood M.D., Epiphytic suspended soils from Borneo and Amazonia differ in their microbial community composition, *Acta Oecologica*, 2020, Vol. 1, pp. 106, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actao.2020.103586>.

21. Dorchenkova Y.A., Gracheva T.A., Babich T.L., Sokolova D.S., Alexandrova A.V., Pham G.T.H., Lysak L.V., Golovchenko A.V., Manucharova N.A., Soil Actinomycetes of Vietnam Tropical Forests, *Forests*, 2022, Vol. 13, pp. 1–23, DOI: <https://doi.org/10.3390/f13111863>.

22. Eberspächer J., Lingens F., The Genus *Phenylobacterium*, *The Prokaryotes*, 2006, Vol. 5, pp. 250–256, DOI: [https://doi.org/10.1007/0-387-30745-1\\_13](https://doi.org/10.1007/0-387-30745-1_13).

23. Eskov A.K., Zverev A.O., Abakumov E.V., Microbiomes in Suspended Soils of Vascular Epiphytes Differ from Terrestrial Soil Microbiomes and from Each Other, *Microorganisms*, 2021, Vol. 9, pp. 1033, DOI: <https://doi.org/10.3390/microorganisms9051033>.
24. Falagán C., Johnson D.B., *Acidibacter ferrireducens* gen. nov., sp. nov.: an acidophilic ferric iron-reducing gammaproteobacterium, *Extremophiles: life under extreme conditions*, 2014, Vol. 18 (6), pp. 1067–1073, DOI: <https://doi.org/10.1007/s00792-014-0684-3>.
25. García-Fraile P., Benada O., Cajthaml T., Baldrian P., Lladó S., *Terracidiphilus gabretensis* gen. nov., sp. nov., an Abundant and Active Forest Soil Acidobacterium Important in Organic Matter Transformation, *Applied and environmental microbiology*, 2016, Vol. 82 (2), pp. 560–569, DOI: <https://doi.org/10.1128/AEM.03353-15>.
26. Gopikrishnan V., Radhakrishnan M., Krupakar P., Manigundan K., Abirami B., Reshma S., Endosymbiotic interactions of actinobacteria with the insects, *Microbial Symbionts*, Academic Press, 2023, pp. 645–658, DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99334-0.00001-3>.
27. Green S.J., Prakash O., Jasrotia P., Overholt W.A., Cardenas E., Hubbard D., Tiedje J.M., Watson D.B., Schadt C.W., Brooks S.C., Kostka J.E., Denitrifying bacteria from the genus *Rhodanobacter* dominate bacterial communities in the highly contaminated subsurface of a nuclear legacy waste site, *Applied and environmental microbiology*, 2012, Vol. 78 (4), pp. 1039–1047, DOI: <https://doi.org/10.1128/AEM.06435-11>.
28. Gulati P., Ghosh M., Biofilm forming ability of *Sphingomonas paucimobilis* isolated from community drinking water systems on plumbing materials used in water distribution, *J Water Health*, 2017, Vol. 15 (6), pp. 942–954, DOI: <https://doi.org/10.2166/wh.2017.294>.
29. Hennessee C.T., Seo J.S., Alvarez A.M., Li Q.X., Polycyclic aromatic hydrocarbon-degrading species isolated from Hawaiian soils: *Mycobacterium crocinum* sp. nov., *Mycobacterium pallens* sp. nov., *Mycobacterium rutilum* sp. nov., *Mycobacterium rufum* sp. nov. and *Mycobacterium aromaticivorans* sp. nov., *International journal of systematic and evolutionary microbiology*, 2009, Vol. 59 (Pt. 2), pp. 378–387, DOI: <https://doi.org/10.1099/ijs.0.65827-0>.
30. Indrasumunar A., Menzies N.W., Dart P.J., Laboratory prescreening of *Bradyrhizobium japonicum* for low pH, Al and Mn tolerance can be used to predict their survival in acid soils, *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, Vol. 48, pp. 135–141, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.01.019>.
31. Jung J., Park W., Acinetobacter species as model microorganisms in environmental microbiology: current state and perspectives, *Applied microbiology and biotechnology*, 2015, Vol. 99 (6), pp. 2533–2548, DOI: <https://doi.org/10.1007/s00253-015-6439-y>.

32. Koch I.H., Gich F., Dunfield P.F., Overmann J., *Edaphobacter modestus* gen. nov., sp. nov., and *Edaphobacter aggregans* sp. nov., acidobacteria isolated from alpine and forest soils, *International journal of systematic and evolutionary microbiology*, 2008, Vol. 58 (Pt. 5), pp. 1114–1122, DOI: <https://doi.org/10.1099/ijs.0.65303-0>.
33. Kulichevskaya I.S., Kostina L.A., Valášková V., Rijpstra W.I.C., Sinninghe Damsté J.S., de Boer W., Dedysh S.N., *Acidicapsa borealis* gen. nov., sp. nov. and *Acidicapsa ligni* sp. nov., subdivision 1 Acidobacteria from Sphagnum peat and decaying wood, *International journal of systematic and evolutionary microbiology*, 2012, Vol. 62 (Pt. 7), pp. 1512–1520, DOI: <https://doi.org/10.1099/ijs.0.034819-0>.
34. Kulichevskaya I.S., Suzina N.E., Liesack W., Dedysh S.N., *Bryobacter aggregatus* gen. nov., sp. nov., a peat-inhabiting, aerobic chemo-organotroph from subdivision 3 of the Acidobacteria, *International journal of systematic and evolutionary microbiology*, 2010, Vol. 60 (Pt. 2), pp. 301–306, DOI: <https://doi.org/10.1099/ijs.0.013250-0>.
35. Magurran A.E., Ecological Diversity and Its Measurement, *Springer Netherlands*, 1988.
36. Monciardini P., Cavaletti L., Schumann P., Rohde M., Donadio S., *Conexibacter woesei* gen. nov., sp. nov., a novel representative of a deep evolutionary line of descent within the class Actinobacteria, *International journal of systematic and evolutionary microbiology*, 2003, Vol. 53 (Pt. 2), pp. 569–576, DOI: <https://doi.org/10.1099/ijs.0.02400-0>.
37. Nievas F.L., Bogino P.C., Giordano W., Quorum sensing signaling molecules and their inhibitors in legume-associated bacteria, In: Singh V.P., Singh S., Tripathi D. K., Prasad S.M., Bhardwaj R., Chauhan D.K. (Eds), *Abiotic Stress and Legumes*, Academic Press, 2021, pp. 277–289, DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815355-0.00014-X>.
38. Okamura K., Kawai A., Yamada T., Hiraishi A., *Acidipila rosea* gen. nov., sp. nov., an acidophilic chemoorganotrophic bacterium belonging to the phylum Acidobacteria, *FEMS microbiology letters*, 2011, Vol. 317 (2), pp. 138–142, DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1574-6968.2011.02224.x>.
39. Pankratov T.A., Dedysh S.N., *Granulicella paludicola* gen. nov., sp. nov., *Granulicella pectinivorans* sp. nov., *Granulicella aggregans* sp. nov. and *Granulicella rosea* sp. nov., acidophilic, polymer-degrading acidobacteria from Sphagnum peat bogs, *International journal of systematic and evolutionary microbiology*, 2010, Vol. 60 (Pt. 12), pp. 2951–2959, DOI: <https://doi.org/10.1099/ijs.0.021824-0>.
40. Park S., Yoon J.H., *Hirschia litorea* sp. nov., isolated from seashore sediment, and emended description of the genus Hirschia, *International journal of systematic and evolutionary microbiology*, 2013, Vol. 63 (Pt. 5), pp.

1684–1689, DOI: <https://doi.org/10.1099/jjs.0.044297-0>.

41. Paudel L., Ghimire N., Han S.R., Park H., Jung S.H., Oh T.J., Complete genome of *Nakamurella* sp. PAMC28650: genomic insights into its environmental adaptation and biotechnological potential, *Functional & integrative genomics*, 2022, Vol. 23 (1), pp. 18, DOI: <https://doi.org/10.1007/s10142-022-00937-6>.

42. Perez-Gimenez J., Mongiardini E.J., Althabegoiti M.J., Covelli J., Quelas J.I., Lopez-Garcia S.L., Lodeiro A., R. Soybean Lectin Enhances Biofilm Formation by *Bradyrhizobium japonicum* in the Absence of Plants, *International Journal of Microbiology*, 2009, Vol. 2009, pp. 8, DOI: <https://doi.org/10.1155/2009/719367>.

43. Prashar P., Kapoor N., Sachdeva S., Rhizosphere: Its structure, bacterial diversity and significance, *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 2013, Vol. 13, DOI: <https://doi.org/10.1007/s11157-013-9317-z>.

44. Rinaudi L.V., Giordano W., An integrated view of biofilm formation in rhizobia, *FEMS Microbiology Letters*, 2010, Vol. 304, pp. 1–11, DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1574-6968.2009.01840.x>.

45. Schloss P.D., Westcott S.L., Ryabin T., Hall J.R., Hartmann M., Hollister E.B., Lesniewski R.A., Oakley B.B., Parks D.H., Robinson C.J., Sahl J.W., Stres B., Thallinger G.G., Van Horn D.J., Weber C.F., Introducing mothur: open-source, platform-independent, community-supported software for describing and comparing microbial communities, *Applied and environmental microbiology*, 2009, Vol. 75 (23), pp. 7537–7541, DOI: <https://doi.org/10.1128/AEM.01541-09>.

46. Walsh C.M., Gebert M.J., Delgado-Baquerizo M., Maestre F.T., Fierer N., A Global Survey of Mycobacterial Diversity in Soil, *Applied and environmental microbiology*, 2019, Vol. 85 (17), DOI: <https://doi.org/10.1128/AEM.01180-19>.

47. Wilhelm R.C., Following the terrestrial tracks of *Caulobacter* - redefining the ecology of a reputed aquatic oligotroph, *The ISME journal*, 2018, Vol. 12 (12), pp. 3025–3037, DOI: <https://doi.org/10.1038/s41396-018-0257-z>.

48. Zhang Y., Binbin Ouyang, Wenli Zhang, Cuie Guang, Wei Xu, Wanmeng Mu Deoxynivalenol: Occurrence, toxicity, and degradation, *Food Control*, 2024, Vol. 155, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2023.110027>.

49. MOTHUR, URL: [https://mothur.org/wiki/miseq\\_sop/](https://mothur.org/wiki/miseq_sop/).

УДК 631.45

DOI: 10.19047/0136-1694-2026-127-160-188



### Ссылки для цитирования:

Белозерцева И.А., Энх-Амгалан С., Гагаринова О.В., Емельянова Н.В., Гэрэлмаа Г., Амарсанаа О., Саранцэцэг Б., Урантамир Г., Аяулы Е., Ганзориг О., Гэрэлт-Од Д. Экологическое состояние почв и вод в горнодобывающих районах Южногобийского аймака Монголии // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2026. Вып. 127. С. 160-188. DOI: 10.19047/0136-1694-2026-127-160-188

### Cite this article as:

Belozertseva I.A., Enkh-Amgalan S., Gagarinova O.V., Emelyanova N.V., Gerelmaa G., Sarantsetseg B., Urantamir G., Ayuuly E., Ganzorig O., Gerelt-Od D., Ecological state of soils and waters in the mining areas of South Gobi province of Mongolia, Dokuchaev Soil Bulletin, 2026, V. 127, pp. 160-188, DOI: 10.19047/0136-1694-2026-127-160-188

### Благодарность:

Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда № 24-47-03004 по теме: “Геоэкономические и геоэкологические приоритеты нового ресурсно-индустриального освоения районов востока России и Монголии в условиях обострения геополитической ситуации и создания международных транспортных коридоров” (<https://rscf.ru/project/24-47-03004>).

### Acknowledgments:

The study was funded by the Russian Science Foundation grant No. 24-47-03004 on the topic: “Goeconomic and geocological priorities of new resource-industrial development of the regions of eastern Russia and Mongolia in the context of an aggravated geopolitical situation and the creation of international transport corridors” (<https://rscf.ru/project/24-47-03004>).

## Экологическое состояние почв и вод в горнодобывающих районах Южногобийского аймака Монголии

© 2026 г. И. А. Белозерцева<sup>1,2\*</sup>, С. Энх-Амгалан<sup>3,4</sup>,  
О. В. Гагаринова<sup>1</sup>, Н. В. Емельянова<sup>1,5</sup>, Г. Гэрэлмаа<sup>4</sup>,  
О. Амарсанаа<sup>4</sup>, Б. Саранцэцэг<sup>6</sup>, Г. Урантамир<sup>3</sup>, Е. Аяулы<sup>7</sup>, У.  
Ганзориг<sup>3</sup>, Д. Гэрэлт-Од<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, Россия,  
664033, Иркутск, ул. Улан-Баторская, д.1,  
<https://orcid.org/0000-0000-7995-2298>, e-mail: [belozia@mail.ru](mailto:belozia@mail.ru).*

<sup>2</sup>*Иркутский государственный университет, Россия,  
664011, Иркутск, ул. Сухэ-Батора, д. 5*

<sup>3</sup>*Институт Географии и Геоэкологии Академии наук Монголии,  
Монголия, 15170, Улаанбаатар, район Чингэлтэй,  
4-й квартал, ул. Западная Сэлбэ, д. 15.*

<sup>4</sup>*Международный университет Улан-Батора Монголии, Монголия,  
г. Улан-Батор, район Баянзурх, 25-й квартал, ул. Намянджү.*

<sup>5</sup>*Иркутский институт химии им. А.Е.Фаворского СО РАН, Россия,  
664033, Иркутск, ул. Фаворского, д.1.*

<sup>6</sup>*Центр исследований стихийных бедствий научно-исследовательского  
института при университете внутренних дел Монголии, Монголия,  
Улаанбаатар, ул. Хилчин-8,*

<sup>7</sup>*Институт философии Баян-Ульгийского отделения  
Академии наук Монголии, Монголия,  
83123, аймак Баян-Ульгий, сомон Улгий, 5-ый баг, ул. Зуха батор.  
Поступила в редакцию 04.04.2025, после доработки 06.05.2025,  
принята к публикации 27.01.2026*

**Резюме:** В 2024 г. проведены ландшафтно-геохимические исследования в южных районах Монголии в районе добычи угля (предприятие “Таван Толгой”) и меди (предприятие “Оую Толгой”). Отобраны образцы грунтовых вод и почв, проведены химико-аналитические работы. Дана оценка экологического состояния почв и подземных вод в горнодобывающих сомонах Ханбогд и Цогтцэций Южногобийского аймака Монголии. В результате проведенных исследований выявлено, что грунтовые воды в районе добычи меди в основном пресные, на территории добычи угля – слабосолоноватые. Почвы в основном представлены сероземовидными, относятся к карбонатным, иногда к засоленным. Выявлены очаги загрязнения грунтовых вод и почв на территории фермерских хозяйств, находящихся вблизи горнодобывающих предприятий. В водах колодцев и скважин местных жителей обнаружены высокие концентрации ионов натрия, фтора, магния, хлора, сульфатов и ряда токсичных тяжелых металлов. В почвах тех же районов выявлены повышенные содержания никеля, меди, цинка и мышьяка, превышающие санитарно-гигиенические нормы, иногда более чем в 20 раз.

**Ключевые слова:** почвы; подземные воды; экология; экстремальные климатические условия.

## **Ecological state of soils and waters in the mining areas of South Gobi province of Mongolia**

© 2026 I. A. Belozertseva<sup>1,2\*</sup>, S. Enkh-Amgalan<sup>3,4</sup>,  
O. V. Gagarinova<sup>1</sup>, N. V. Emelyanova<sup>1,5</sup>, G. Gerelma<sup>4</sup>,  
O. Amarsanaa<sup>4</sup>, B. Sarantsetseg<sup>6</sup>, G. Urantamir<sup>3</sup>, E. Ayauli<sup>7</sup>,  
U. Ganzorig<sup>3</sup>, D. Gerelt-Od<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*V.B. Sochava Institute of Geography SB RAS,  
1 Ulaanbaatar Str., Irkutsk 664033, Russian Federation,  
<https://orcid.org/0000-0000-7995-2298>, e-mail: [belozia@mail.ru](mailto:belozia@mail.ru).*

<sup>2</sup>*Irkutsk State University,  
5 Sukhbaatar Str., Irkutsk 664011, Russian Federation.*

<sup>3</sup>*Institute of Geography and Geoecology Mongolian Academy of Sciences,  
Building 15, 4<sup>th</sup> Khoroo, Zapadnaya Selbe Street, Chingeltei District,  
Ulaanbaatar 15170, Mongolia.*

<sup>4</sup>*Ulaanbaatar International University of Mongolia,  
Namyangzhu Street, 25<sup>th</sup> Khoroo, Bayanzurkh District, Mongolia.*

<sup>5</sup>*A.E. Favorsky Irkutsk Institute of Chemistry SB RAS,  
1 Favorsky Str., Irkutsk 664033, Russian Federation.*

<sup>6</sup>*Disaster research center of Integrated Research Institute  
at University of Internal Affairs,  
8 Khilchina Str., Ulaanbaatar, Mongolia.*

<sup>7</sup>*Institute of Philosophy, Mongolian Academy of Sciences Department in  
Bayan-Ulgii aimag, Zukh Bator Street, 5<sup>th</sup> bag, Somon Ulgiy,  
Bayan-Ulgii aimak, 831123, Mongolia.*

*Received 04.04.2025, Revised 06.05.2025, Accepted 27.01.2026*

**Abstract:** In 2024, landscape geochemical studies were conducted in the southern regions of Mongolia in the area of coal (Tavan Tolgoi enterprise) and copper (Ouyu Tolgoi enterprise) mining. Samples of groundwater and soils were collected, chemical and analytical work was carried out. The purpose of the work is to assess the ecological state of soils and groundwater in the mining soums of Khanbogd and Tsogttsetsii of the South Gobi aimag of Mongolia. As a result of the studies, it was found that the groundwater in the copper mining area is mainly fresh, while in the coal mining area it is slightly

saline. Soils are mainly sierozem-like, belong to carbonate, and sometimes to saline. Foci of groundwater and soil pollution were identified on the territory of farms located near mining enterprises. High concentrations of sodium, fluorine, magnesium, chlorine, sulfates and a number of toxic heavy metals have been found in the waters of wells and boreholes of local residents. Increased levels of nickel, copper, zinc and arsenic have been found in the soils of the same areas, exceeding sanitary and hygienic standards, sometimes by more than 20 times.

**Keywords:** soils; groundwater; ecology; extreme climatic conditions.

## ВВЕДЕНИЕ

Южногобийский аймак занимает площадь в 165 тыс. км<sup>2</sup> в южной части Монголии. Вся территория аймака входит в состав Гобийского региона и расположена на высоте 1300–2825 м над уровнем моря. Аймак состоит из 15 сомонов, 69% территории которых занимают пастбища, а 24% – земли особо охраняемых природных территорий (ООПТ). Во всех сомонах аймака развито традиционное скотоводство. Численность населения составляет 76.1 тыс. человек.

На территории аймака разрабатываются месторождения природных полезных ископаемых и ресурсов, считающиеся крупными не только в стране, но и в мире. К ним относятся, например, стратегически важные месторождения золота и меди “Оюу Толгой”, месторождение угольной группы “Таван Толгой”, месторождение золота “Цагаан Суварга” и др. В Южногобийском аймаке сосредоточено более 60% запасов угля Монголии. Общие запасы угля месторождения “Таван Толгой” составляет 5.1 млрд т, из них 1.5 млрд т составляет коксующийся уголь.

Исследования в рамках совместного российско-монгольского проекта проводились в сомонах Ханбогд и Цогтцэций Южногобийского аймака, где в последние годы происходит бурное развитие горнодобывающей промышленности и резкий рост численности населения. По состоянию на 2023 г. (National Report, 2024) в этих сомонах насчитывалось 19.1 тыс. человек, при этом возросла миграция населения в горнодобывающие сомоны. За период с 2010 по 2020 гг. население сомонов Ханбогд и Цогтцэций увеличилось на 138–150%, тогда

как население близлежащего сомона Баяновоо – всего на 15%. В целом население сомонов с развитой горнодобывающей промышленностью за 10 лет выросло в 10 раз.

В целом территория сомонов Ханбогд и Цогтцэций составляет 2 240 тыс. га, из которых 1 878 тыс. га – земли сельскохозяйственного назначения, 202 тыс. га – земли государственных предприятий и организаций, 133 тыс. га – лесные массивы, 13 тыс. га. – земли поселений.

Сомон Ханбогд занимает территорию 1 515 тыс. га с общей численностью населения 8 941 чел. (2023 г.). Основными отраслями экономики являются животноводство и горнодобывающая промышленность. В 2023 г. в сомоне Ханбогд насчитывалось 164 тыс. голов домашнего скота. Здесь расположено крупнейшее в Монголии месторождение меди – “Оюу Толгой”. Через сомон проходят автомобильная и железнодорожная дороги, используемые для перевозки полезных ископаемых.

Общая площадь сомона Цогтцэций составляет 72.5 км<sup>2</sup>, в нем проживает 10 тыс. человек населения и имеется 3 тыс. домохозяйств. Основным сектором экономики является животноводство, насчитывается 135 тыс. голов домашнего скота (2023 г.). При этом сомон богат полезными ископаемыми (уголь, гипс, золото, медь, соль) и в последние годы происходит быстрое развитие горнодобывающей промышленности. Такие крупные горнодобывающие компании, как АО “Таван Толгой”, ООО “Энергетические ресурсы” и АО “Эрдэнэс Таван Толгой”, осуществляют горнодобывающую и транспортную деятельность, развивают транспортную и инженерную инфраструктуру территории.

Развитие горнодобывающей промышленности в Южногобийском аймаке является основным рычагом развития территории, но оттесняет на второй план исторический вид деятельности населения – животноводство, и создает значительное негативное техногенное воздействие на окружающую среду.

Климат территории исследования экстремально-континентальный. Зима продолжительная, холодная и сухая (температура воздуха опускается до –40 °С). Весной наблюдаются метели и пыльные бури. Лето короткое и жаркое (до +45 °С). В июле и августе выпадает основная часть осадков (от 100 до 200 мм), в

среднем за год – 194 мм (Ecosystems, 2019).

В период проведения экспедиционных исследований в конце июля – начале августа 2024 г. отмечено повышенное количество осадков, обусловившее хорошее развитие растительности. Во всех фермерских хозяйствах имеются колодцы или скважины, во многих случаях присутствуют оба источника водоснабжения. Все исследованные колодцы были наполнены водой. Некоторые фермеры имеют систему капельного орошения для выращивания кормов для животных (пшеница и др.), овощей и фруктов (капуста, свекла, зелень, арбузы и т. д.) (рис. 1).

В засушливые годы и периоды опасных природных явлений (“зуд”) из-за скудного развития растительности или ее полного отсутствия отмечается падеж скота (Nyamtseren et al., 2018). По данным официальных источников и рассказам местного населения, в таких случаях горнодобывающие компании оказывали безвозмездную помощь местным фермерам, привозя корма с соседних территорий. Некоторые члены фермерских семей работают на горнодобывающих предприятиях и имеют хороший дополнительный доход. Большая часть фермерских хозяйств обеспечена современными домами, юртами, транспортными средствами, солнечными батареями, спутниковыми антеннами и др. Традиционно семьи фермеров многодетные.

В ландшафтно-геохимическом отношении данная территория учеными мало исследована. Процессам аридизации почв посвящен ряд статей (Панкова, Конюшкова, 2013; Панкова, Черноусенко, 2020 и др.). Имеются аналитические данные общественных организаций Монголии, самих горнодобывающих предприятий (Экологический мониторинг..., 2023). Эколого-геохимические исследования проводились учеными в других более близкорасположенных к Улан-Батору горнодобывающих районов, например, в бассейне р. Селенга (Kasimov et al., 2016), в Прибайкалье (Воробьева, Власова, 2020), в Забайкалье (Копылова и др., 2013; Выркин и др., 2014; Шеховцов, Белозерцева, 2016). Учеными выявлено аномально высокое содержание ТМ в почвах и растительности в районах действующих и давно закрытых горнодобывающих предприятий.



**Рис. 1.** Ключевые площадки № 4 и 5 (фермерские хозяйства в 18 км и в 7 км на запад от предприятия по добыче меди).

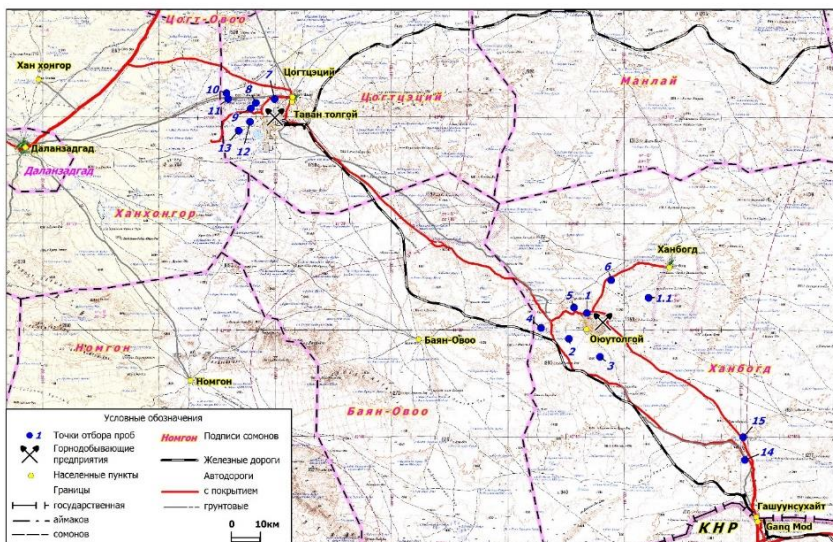
**Fig. 1.** Key sites No. 4 and 5 (farms 18 km and 7 km west of the copper mining plant).

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

В конце июля – начале августа 2024 г. проведены экспедиционные ландшафтно-геохимические и водно-экологические исследования для определения уровня загрязнения природной среды в районах горнодобывающих предприятий (Цогтэцийсум и Ханбогд, сомоны Южногобийского аймака). Образцы грунтовых вод и почв отобраны на территориях, прилегающих к угледобывающим предприятиям месторождения “Таван Толгой” и медедобывающему предприятию месторождения “Оую Толго” (рис. 2).

Фоновый участок с преобладающими сероземовидными почвами находится в 60 км на юго-восток (ЮВ) от предприятия “Таван Толгой” и в 52 км на северо-запад (СЗ) от предприятия “Оую Толго”.

а



б



с



**Рис. 2.** Основные ключевые площадки отбора проб воды и почв (а), территории угледобывающего предприятия “Таван Толгой” и медедобывающего предприятия “Оую Толгой” (б), фермерские хозяйства (с).

**Fig. 2.** The main key sites for collecting water and soil samples (a), the territories of the “Tavan Tolgoi” coal mining and “Ouyu Tolgoi” copper mining enterprises (b), and farms (c).

Проведены химико-аналитические работы в полевых и камеральных условиях по стандартным методикам в Институте географии и геоэкологии МАН, в аккредитованном химико-аналитическом центре Института географии им. В.В. Сочавы СО РАН, в аккредитованной лаборатории “Геоаналитик” (ГОСТ Р

51232-98; ИСО 11885 (ГОСТ Р 57165-2016); ISO 14869; Теория и практика..., 2006; Шпейзер, Минеева, 2006; Алекин и др., 1973; Аринушкина, 1970 и др.). Величину рН, фторидов, хлоридов, гидрокарбонатов, фосфатов, аммония, нитритов, взвешенных веществ в воде определяли в полевых условиях с помощью полевой комплексной химической лаборатории с дополнительным оборудованием (рН-метр, фотоколориметр и др.) в день отбора проб по общепринятым методикам. Водородный показатель (рН) в воде измерялся потенциометрическим методом. Содержание гидрокарбонатов определяли титриметрическим методом, массовую концентрацию нитритов – фотометрическим методом с реактивом Грисса, содержание хлоридов – аргентометрическим методом, концентрацию нитратов – фотометрическим методом с салициловой кислотой. Содержание ионов аммония измеряли фотометрическим методом с реактивом Несслера, концентрацию фосфатов – фотометрическим методом с восстановлением аскорбиновой кислотой. Содержание фтора определялось фотометрическим методом с лантан ализаринкомплексом. Содержание металлов установлено методом атомно-эмиссионной спектроскопии. Концентрация нефтепродуктов определена на флюорате. Реакция почвенной среды ( $pH_{\text{водн}}$ ) определена потенциометрическим методом, содержание органического углерода ( $C_{\text{орг}}$ ) – методом мокрого сжигания по Тюрину, гранулометрический состав почв – по Качинскому. Содержание основных элементов питания растений установлено с помощью агрохимических методов исследования почв (Ильковская и др., 1975).

Использованы данные: статистические, геоэкологического мониторинга территории промышленных площадок, представленные предприятием по добыче угля; общественной организации “Монх ногоон галба”; администраций районов Цогтцэцийсум и Ханбогд (National Report, 2024; Экологический мониторинг..., 2023 и др.).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Горнодобывающие предприятия и населенные пункты аймака расположены на пустынной и полупустынной территории, где отсутствуют поверхностные водные объекты, за исключением

временных водотоков и озер, образующихся в период выпадения интенсивных осадков.

Экологическое состояние Южногобийского аймака формируется в условиях дефицита водных ресурсов и существенных техногенных воздействий горнодобывающих производств. Интенсивное развитие промышленности создает положительный эффект в экономическом развитии территории, но негативно влияет на природную среду, ведет к загрязнению почвы, воды, воздуха, а также к сокращению сельскохозяйственных территорий (пастбищ).

Водоснабжение предприятий и населения осуществляется главным образом за счет подземных вод месторождения “Гунийхулой”. При этом деятельность горнопромышленных предприятий требует большого количества воды, что ведет к снижению запасов подземных вод, которое проявляется в обезвоживании колодцев и уменьшении дебита скважин. Дефицит водных ресурсов сопровождается снижением качества воды, что связано с фильтрацией загрязняющих веществ в водоносные горизонты из карьерных и шахтных разработок, а также через почвенно-грунтовые слои с поверхности.

Материалы экологического мониторинга на территории промышленных предприятий, осуществляемого горнодобывающими компаниями, свидетельствуют о высокой общей минерализации воды, превышающей нормативные требования к питьевой воде в среднем в 2 раза, в связи с чем проводится предварительная ее подготовка для питьевых целей. В холле помещения угледобывающего предприятия в открытом доступе работникам предоставляется очищенная бутилированная вода.

Результаты проведенных ландшафтно-геохимических исследований показали, что по степени минерализации вода скважин и колодцев вблизи предприятия по добыче меди (“Оую Толгой”) в основном является пресной ( $502\text{--}799\text{ мг/дм}^3$ ), но встречается и слабосоленоватая вода ( $1\ 011\text{ мг/дм}^3$ , скважина в 5 км на С-3 от предприятия). По химическому составу вода относится к кальциевой и натриевой группе гидрокарбонатного типа, в глубоких (более 70 м) скважинах – к натриевой группе сульфатного класса. В воде скважин и колодцев в районе медного месторождения отме-

чено высокое содержание натрия ( $203 \text{ мг/дм}^3$ ) и фтора ( $1.00\text{--}2.74 \text{ мг/дм}^3$ ), превышающее ПДК (СанПиН 1.2.3685-21, 2021).

Грунтовые воды в районе угледобывающего предприятия (“Таван Толгой”) имеют более высокие значения общей минерализации от  $534$  до  $2\ 003 \text{ мг/дм}^3$ . Встречается как пресная, так и слабосоленоватая вода, которая относится к натриевой группе гидрокарбонатного и сульфатного класса. При этом в глубоких скважинах (более  $80 \text{ м}$ ) выявлена вода натриевой группы хлоридного класса. В воде отмечено превышение ПДК магния ( $11\text{--}104 \text{ мг/дм}^3$ ), хлора ( $72\text{--}430 \text{ мг/дм}^3$ ) и сульфатов ( $95\text{--}790 \text{ мг/дм}^3$ ). Кислотность грунтовых вод в районах исследования характеризуется в основном слабощелочной реакцией ( $\text{pH } 7.6\text{--}8.2$ ), на одной площадке – близкой к нейтральной ( $\text{pH } 7.3$ ) в пределах ПДК (табл. 1). В водопроводной воде медедобывающего предприятия выявлено высокое содержание хлора ( $1\ 008 \text{ мг/дм}^3$ ) и сульфатов ( $870 \text{ мг/дм}^3$ ).

Содержание Mo, Ba, Cu, Fe, Zn, Sr, Co и Hg в воде колодцев и скважин исследуемых районов не превышает ПДК (СанПиН 1.2.3685-21) и имеет следующие значения:  $0.01\text{--}0.10$ ;  $0.00\text{--}0.08$ ;  $0.00\text{--}0.02$ ;  $0.02\text{--}0.09$ ;  $0.00\text{--}0.09$ ;  $0.09\text{--}4.48$ ;  $0.000\text{--}0.005 \text{ мг/дм}^3$  соответственно. Концентрации Mn, Pb, Ni, Cr, Cd и As в грунтовых водах около предприятия по добыче меди превышают или находятся на уровне ПДК с максимальными значениями  $0.12$ ;  $0.02$ ;  $0.02$ ;  $0.05$ ;  $0.003$ ,  $0.09 \text{ мг/дм}^3$  соответственно (табл. 2). В водопроводной воде медедобывающего предприятия выявлены повышенные концентрации As и Cd ( $0.01$  и  $0.003 \text{ мг/дм}^3$  соответственно) на уровне и выше ПДК. В районе добычи угля в грунтовых водах обнаружено высокое содержание V, Cd и As, превышающее или находящееся на уровне ПДК (их концентрации достигают  $3.37$ ;  $0.002$ ,  $0.02 \text{ мг/дм}^3$  соответственно).

Концентрация нефтепродуктов в грунтовых водах исследуемых территорий колеблется от  $0$  до  $0.022 \text{ мг/дм}^3$ , за исключением площадки вблизи угледобывающего предприятия “Таван-Толгой”, где содержание нефтепродуктов ( $0.141 \text{ мг/дм}^3$ ) в воде колодца (глубина  $3 \text{ м}$ ) превышало ПДК ( $0.10 \text{ мг/дм}^3$ ).

**Таблица 1.** Предельные и средние значения pH, содержания нефтепродуктов и основных ионов в грунтовых водах на территории месторождений и добычи меди и угля, Южногобийский аймак Монголии (сомоны Ханбогд, Цогтцэций)

**Table 1.** Limit and average values of pH, content of oil products and main ions in groundwater in the territory of copper and coal deposits and mining, South Gobi aimag of Mongolia (Khanbogd, Tsogtsetsii somons)

Предельные и средние значения	pH	Анионы							Катионы					$\Sigma^*$ , мг/дм <sup>3</sup>	НП** мг/дм <sup>3</sup>
		F <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>		
		мг/дм <sup>3</sup>													
В районе предприятия “Оюн Толгой” по добыче меди															
максимум	8.2	2.74	356.9	226.1	330.0	0.80	18.00	0.25	132.3	28.3	7.2	202.5	0.7	1011	0.022
минимум	7.7	1.00	91.5	35.7	60.2	0.00	3.53	0.00	42.9	6.7	0.8	62.1	0.0	502	0.000
среднее	7.9	1.50	219.2	103.4	165.8	0.12	8.53	0.07	73.3	13.8	3.0	93.8	0.2	683	0.010
В районе предприятия “Таван Толгой” по добыче угля															
максимум	8.2	1.54	610.0	429.6	790.0	5.0	12.00	0.25	144.7	77.2	3.6	171.0	0.0	2003	0.141
минимум	7.3	1.08	170.8	71.7	95.0	0.0	0.00	0.00	21.6	11.3	0.7	82.0	0.0	535	0.003
среднее	7.7	1.30	298.9	240.8	347.9	0.8	7.43	0.11	63.8	36.4	1.8	121.7	0.0	1121	0.030
Класс опасности	-	-	4	-	4	4	4	4	4	4	4	4	4	-	3
ПДК***	6-9	1.5	-	350	500	3	45	-	-	50	-	200	1.5	1500	0.10

**Примечание.**  $\Sigma^*$  – минерализация; НП\*\* – нефтепродукты; \*\*\* Согласно СанПиН 1.2.3685-21; прочерк – не установлены.

**Note.**  $\Sigma^*$  – mineralization; NP\*\* – petroleum products; \*\*\* According to (SanPiN 1.2.3685-21); dash – not installed.

**Таблица 2.** Предельные и средние значения содержания макро- и микроэлементов в грунтовых водах на территории месторождений и добычи меди и угля, Южногобийский аймак Монголии (сомоны Ханбогд, Цогтцэций), мг/дм<sup>3</sup>

**Table 2.** Limit and average values of macro- and microelements in groundwater in the territory of copper and coal deposits and mining, South Gobi aimag of Mongolia (Khanbogd, Tsogttsetsii somons), mg/dm<sup>3</sup>

Предельные и средние значения	Mo	Mn	Ba	Al	Pb	Ni	Cu	Fe	Zn	Sr	Co	Cr	V	Cd	As	Hg
В районе предприятия “Оюн Толгой” по добыче меди																
максимум	0.10	0.12	0.08	0.04	0.02	0.020	0.02	0.09	0.00	1.71	0.005	0.05	0.02	0.003	0.09	0.000
минимум	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.000	0.01	0.02	0.00	0.21	0.000	0.00	0.00	0.000	0.00	0.000
среднее	0.04	0.04	0.03	0.01	0.00	0.010	0.01	0.04	0.00	0.71	0.002	0.03	0.01	0.001	0.04	0.000
Около предприятия “Таван Толгой” по добыче угля																
максимум	0.07	0.06	0.06	0.02	0.00	0.000	0.01	0.07	0.09	4.48	0.001	0.01	3.37	0.002	0.02	0.000
минимум	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00	0.02	0.00	0.09	0.000	0.00	0.00	0.000	0.00	0.000
среднее	0.03	0.03	0.02	0.01	0.00	0.000	0.00	0.03	0.023	1.10	0.001	0.00	0.49	0.001	0.01	0.000
ПДК*	0.07	0.1	0.7	0.2	0.01	0.02	1	0.3	-	7	0.1	-	0.1	0.001	0.01	0.001
КО**	-	4	4	4	2	3	3	2	3	3	3	3	3	2	1	1

**Примечание.** \* Согласно СанПиН 1.2.3685-21; прочерк – не установлены; КО\*\* – класс опасности.

**Note.** According to (SanPiN 1.2.3685-21); dash – not installed; КО\*\* – hazard class.

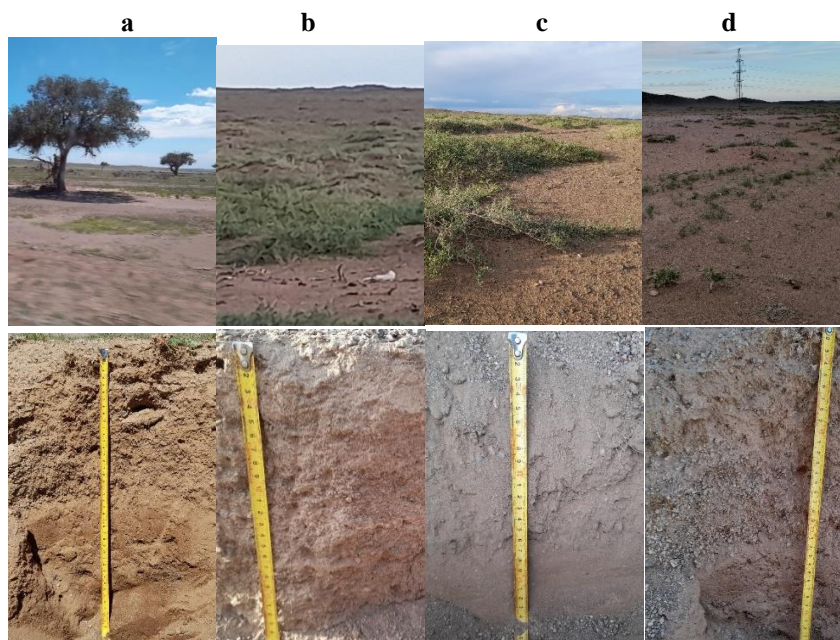
По показателю ИЗВ (индекс загрязнения вод по отношению к ПДК (Глотова, 2006)) вода в колодцах и скважинах относится к условно чистой, умеренно загрязненной и загрязненной. Повышенный ИЗВ (2.11; 1.03; 1.29; 1.16) наблюдается на ключевых площадках № 2, 12, 13, 15 (соответственно) вблизи предприятий по добыче меди и угля, а также на границе с Китаем, где осуществляется разгрузка и погрузка угля.

Почвенный покров территории исследования в основном представлен сероземовидными, встречаются светлогумусовые и псаммоземы (гумусовые) (рис. 3).

По содержанию фракции физической глины (частицы < 0.001 мм варьируют в пределах 13–24%) почвы относятся к супесчаным и легкосуглинистым. Кислотность почв в районе месторождений меди и угля изменяется от слабощелочной до сильнощелочной (8.0–9.2), что соответствует климатическим аридным условиям территории. По степени карбонатности почвы относятся в основном к карбонатным (содержание  $\text{CaCO}_3$  составляет 2.18–9.09%), иногда к слабокарбонатным (1.09–1.45%) (табл. 3).

Почвы исследуемых ключевых районов в основном относятся к незасоленным (минерализация водной вытяжки составляет 0.01–0.09%), за исключением одной площадки с почвами средней степени засоления (0.78%) хлоридно-сульфатного типа. Водная вытяжка почв ключевых площадок содержит ионы гидрокарбонатов (0.030–0.061%%), хлоридов (0.014–0.070%%), натрия (0.028–0.061%%) и сульфатов (0.021–0.152%%). Засоленные почвы можно отнести к слабогипсоносным по одним источникам (Минашина, Шишов, 2002; Панкова, Воробьева, 2006) или гипсосодержащим согласно “Полевому определителю...” (Полевой определитель..., 2008). Содержание органического вещества в почвах невысокое, варьирует от 0.07 до 0.84%.

Почти в каждом хозяйстве имеется колодец и скважина. При поголовье скота более 300 голов фермеры часто выращивают корм, применяя ирригационную систему. В районах фермерских хозяйств отмечено среднее содержание нитратов в почвах – от 10 до 18 мг/кг.



**Рис. 3.** Фотографии ландшафтов и почв ключевых площадок № 1.1 (а), 2 (b), 3 (c), 4 (d).

**Fig. 3.** Photographs of landscapes and soils of key sites No. 1.1 (a), 2 (b), 3 (c), 4 (d).

**Примечание.** Почвы и преобладающие виды растительности: **а** – псаммозем (гумусовый), ильм приземистый, астрагал, вайда, белена, монгольский термосис, ирис, лук; **б** – сероземовидная, карагана, балгур; **с** – сероземовидная, карагана; **д** – сероземовидная гипсосодержащая, карагана, балгур.

**Note.** Soils and dominant vegetation: **a** – Arenosols, *Ulmus pumila*, *Astragalus membranaceus*, *Isatis tinctoria*, *Hyoscyamus*, *Thermopsis mongolica*, *Íris*, *Allium mongolicum*; **b** – Calcisols Aridic, *Caragána arboréscens*, *Anadasis brevifolia*; **c** – Calcisols Aridic, *Caragána arboréscens*; **d** – Gypsisols Aridic, *Caragána arboréscens*, *Anadasis brevifolia*.

**Таблица 3.** Физико-химические показатели верхних горизонтов почв (0–20 см) основных ключевых участков на территории месторождений и добычи меди и угля, Южногобийский аймак Монголии (сомоны Ханбогд, Цогтцэций)

**Table 3.** Physicochemical indicators of the upper soil horizons (0-20 cm) of the main key sites in the territory of copper and coal deposits and mining, South Gobi aimag of Mongolia (Khanbogd, Tsogttsetsii somons)

№ пл	Координаты, местоположение	Почва	рН н <sub>2</sub> о	СаСО <sub>3</sub> , %	Σ*, мг/л	С <sub>орг</sub> , %	S**, %	NO <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
								мг/кг		
<b><i>В районе предприятия “Оюн Толгой” по добыче меди</i></b>										
1	46°16'12" 114°34'12" У центральных ворот предприятия по добыче меди	сероземо- видная	8.8	2.91	173	0.32	21.8	10	0.8	9
1.1	43°7'7" 107°6'31" Около монастыря Дэмчо- гийн Хийд, 13 км на С-В от предпри- ятия	псаммозем гумусовый	8.0	1.45	154	0.12	15.1	0	0.8	27
2	42°34'48" 106°27'0" 6 км от отвала предпри- ятия, около фермеров	сероземо- видная	9.3	8.36	915	0.21	23.0	15	1.5	106

**Продолжение таблицы 3**  
**Table 3 continued**

№ пл	Координаты, местоположение	Почва	рН H <sub>2</sub> O	CaCO <sub>3</sub> , %	Σ*, мг/л	C <sub>орг</sub> , %	S**, %	NO <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
								мг/кг		
<i>В районе предприятия "Оюн Толгой" по добыче меди</i>										
3	42°32'24" 106°31'48" 5 км от предприятия, ферма, 100 голов (ба- раны, козы)	сероземо- видная	8.5	3.64	822	0.15	21.9	2	2.0	33
4	43°0'0" 106°22'48" 18 км от предприятия Ферма, 1000 голов (ко- зы, бараны)	сероземо- видная гип- сосодержа- щая	8.2	2.18	7760	0.29	18.0	18	0.6	347
5	43°2'24" 106°28'12" 7 км на С-3 от пред- приятия. Ферма, 350 голов (бараны, козы). Посадки пшеницы, ар- бузов и пр., система капиллярного полива	сероземо- видная	8.8	3.27	162	0.11	14.9	10	0.4	27

**Продолжение таблицы 3**  
**Table 3 continued**

№ пл	Координаты, местоположение	Почва	рН H <sub>2</sub> O	CaCO <sub>3</sub> , %	Σ*, мг/л	C <sub>орг</sub> , %	S**, %	NO <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
								мг/кг		
<i><b>В районе предприятия “Оюн Толгой” по добыче меди</b></i>										
6	43°5'24" 106°33'36" 12 км на север от пред- приятия, Ферма, 300 голов	светлогуму- совая	8.6	5.09	151	0.55	21.9	5	0.5	38
<i>Пределные и средние значения</i>										
	максимум		9.3	8.36	7760	0.55	23.0	18	2	347
	минимум		8.0	1.45	151	0.02	14.9	0	0.4	9
	среднее		8.6	4.03	2905	0.29	18.8	10	0.8	142
<i><b>В районе предприятия “Таван Толгой” по добыче угля</b></i>										
7	43°25'48" 105°17'24"; 3 км на се- вер от предприятия, ферма Монабаяр	сероземо- видная	8.5	9.09	150	0.61	21.0	5	1.0	76
8	43°25'12" 105°15'0"; 4 км на С-3 от предприятия, ферма Толгой	сероземо- видная	8.2	4.36	691	0.18	18.0	0	0.6	61

**Продолжение таблицы 3**  
**Table 3 continued**

№ пл	Координаты, местоположение	Почва	pH H <sub>2</sub> O	CaCO <sub>3</sub> , %	Σ*, мг/л	C <sub>орг</sub> , %	S**, %	NO <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
								мг/кг		
<i>В районе предприятия "Оюн Толгой" по добыче меди</i>										
9	43°24'36" 105°13'48" 6 км на запад от пред- приятия, ферма Толгой	сероземо- видная	8.6	4.00	142	0.09	24.2	2	0.9	54
10	43°44'24" 105°17'24" 17 км на С-3 от пред- приятия, ферма Жама- ранглав	сероземо- видная	8.8	4.73	197	0.07	15.7	5	0.8	49
12	43°23'24" 105°13'48" 5 км на запад от пред- приятия, ферма Одсурен	сероземо- видная	8.5	7.27	141	0.84	12.7	2	0.4	14
13	43°37'12" 105°20'24" 10 км на Ю-3 от пред- приятия, ферма Монх- болд	сероземо- видная	8.6	2.91	492	0.14	18.6	5	0.6	57

**Продолжение таблицы 3**  
**Table 3 continued**

№ пл	Координаты, местоположение	Почва	pH H <sub>2</sub> O	CaCO <sub>3</sub> , %	Σ*, мг/л	C <sub>орг</sub> , %	S**, %	NO <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
								мг/кг		
<i>Предельные и средние значения</i>										
	максимум		8.8	9.09	691	0.84	24.2	5	1.0	76
	минимум		8.2	2.91	141	0.07	12.7	0	0.4	14
	среднее		8.5	5.39	302	0.32	18.4	3	0.7	52
На границе с Китаем										
15	42°21'0" 107°18'36" В 100 м от разгрузки и погрузки угля	псаммозем	7.8	1.09	476	0.52	13.6	8	0.6	3
16	42°39'36" 107°30'36" В 4 км от площадки № 15	сероземовид ная	9.2	3.64	193	0.25	21.5	1	0.5	27
ПДК***			-			-	-	130	-	-

**Примечание.** Σ\* – минерализация; S\*\* – гранулометрический состав, фракция физической глины <0.01, %; \*\*\* Согласно СанПиН 1.2.3685-21.

**Note.** Σ\* – mineralization; S\*\* – granulometric composition, fraction of physical clay <0.01, %; \*\*\* According to (SanPiN 1.2.3685-21).

В других районах содержание нитратов низкое (0–5 мг/кг). Концентрации подвижных форм фосфора в почвах на очень низком уровне (0.4–2.0 мг/кг) по всей исследуемой территории. Высокие значения рН создают условия, ограничивающие подвижность и доступность для растений соединений фосфора из-за образования нерастворимого фосфата кальция. Содержание подвижных форм калия в почвах тоже в основном низкое (9–106 мг/кг). Исключение составила одна площадка со средними значениями концентрации подвижных форм калия в сероземовидной засоленной почве (347 мг/кг).

Концентрации Ti, Mn, Ba, Mo, Pb, Be, V, Cr, Sr, Co, Cd в почвах исследуемых районов варьируют в интервалах 3400–2007; 484–1295; 424–658; 0–5; 2–19; 1.5–3.6; 55–90; 6–49; 175–403; 6–13; 0.00–0.22 мг/кг (табл. 4), не превышая санитарно-гигиенические нормы. Однако в почвах района угледобывающих предприятий отмечено высокое содержание Ni, Cu, Zn и As (до 29, 131, 123 и 13 мг/кг соответственно), превышающее ПДК. В районе медедобывающего предприятия выявлены также повышенные концентрации Ni, Zn и As в почвах – до 27, 149 и 47 мг/кг соответственно. Загрязняющие химические элементы аккумулируются на карбонатном (щелочном), сорбционном и органическом геохимических барьерах. Выявлена средняя корреляционная связь ( $r_{xy}$  0.32) между концентрацией As и содержанием карбонатов кальция, а также с реакцией среды ( $pH_{\text{водн}}$ ) ( $r_{xy}$  0.40). Установлена средняя корреляционная связь между концентрацией Cu, Zn, As и содержанием суммы фракций физической глины ( $r_{xy}$  0.35; 0.33; 0.32 соответственно). Также наблюдается слабая и средняя корреляционная связь между содержанием органического углерода и концентрацией Ni, Cu, Zn, As ( $r_{xy}$  0.25; 0.20; 0.50; 0.15 соответственно).

Согласно индексу суммарного загрязнения почв ( $\Sigma c$ ), рассчитанного по методикам (СП 47.13330.2012; Сагет и др., 1990), почвы большей части исследованных площадок относятся к категории допустимого загрязнения ( $\Sigma c$  от 3.7 до 13.9). Почвы умеренно опасной категории загрязнения выявлены на площадках № 2 и 10 фермерских хозяйств в районе предприятий по добыче меди и угля ( $\Sigma c = 27.7$  и  $24.9$  соответственно).

**Таблица 4.** Предельные и средние значения содержания микроэлементов в верхних горизонтах почв (0–20 см) территории месторождений и добычи меди и угля, Южногобийский аймак Монголии (сомоны Ханбогд, Цогтцэций)

**Table 4.** Limit and average values of microelement content in the upper soil horizons (0–20 cm) of the copper and coal deposits and mining area, South Gobi aimag of Mongolia (Khanbogd, Tsogtsetsii somons)

Предельные и средние значения	Fe	Ti	Mn	Ba	Mo	Pb	Ni	Cu	Be	V	Cr	Zn	Sr	Co	Cd	As
	%	мг/кг														
В районе предприятия “Оюн Толгой” по добыче меди																
максимум	3.98	3400	1295	658	2.2	22	27	20	3.6	73	49	149	357	10	0.00	47
минимум	2.08	2705	484	451	0.0	5	12	9	1.6	65	16	42	204	6	0.00	0
среднее	2.93	3104	748	546	1.7	10	17	18	2.7	69	26	72	263	9	0.00	12
В районе предприятия “Таван Толгой” по добыче угля																
максимум	3.38	3100	710	580	5.1	17	29	131	3.1	90	49	123	403	13	0.22	13
минимум	2.12	2007	442	424	0.0	2	9	10	1.5	55	6	38	175	7	0.00	0
среднее	2.47	2704	611	528	2.6	9	21	39	2.1	73	31	72	323	10	0.12	4
Фон, более 50 км от предприятий	2.69	2007	442	424	0.0	6	14	10	1.6	55	17	38	175	7	0.10	2
Класс опасности	-	-	3	3	2	1	2	2	-	3	2	1	3	2	1	1
ПДК (СанПиН 1.2.3685-21)	-	-	1500	-	-	32–130	20–80	33–132	-	150	100	55–220	-	17	0.5–2.0	2.0

К опасной категории загрязнения ( $\sum c = 37.3$ ) относятся почвы площадки № 7 на территории фермерского хозяйства, расположенного вблизи угледобывающего предприятия.

Исследования показали, что на прилегающих к предприятиям территориях отмечается снижение уровня подземных вод, истощение и загрязнение воды в колодцах, о чем также свидетельствуют жалобы местного населения. Пересыхание колодцев и мелких скважин наблюдалось в районе угольного месторождения “Таван Толгой”, что в значительной степени обусловлено увеличением объемов углеобогащения и соответственно водопотребления. Неблагоприятная экологическая ситуация в районах горнодобывающих предприятий формируется также в результате загрязнения атмосферного воздуха пылью от погрузки и транспортировки добываемых полезных ископаемых. В условиях минимального количества осадков сильные ветра и загрязнение воздуха создают неблагоприятную экологическую ситуацию для населения, негативно влияют на природную среду, способствуя загрязнению почв и растительности, сокращению биоресурсов для животноводства.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенных ландшафтно-геохимических исследований можно отметить, что высокая степень минерализации, сульфатный и хлоридный класс грунтовых вод соответствуют природно-климатическим условиям сухостепной и полупустынной зон, для которых характерно малое количество атмосферных осадков и высокое испарение.

Исследование содержания металлов в воде колодцев и скважин показало превышение ПДК по отдельным компонентам (Mn, Pb, Fe, Cr, As мг/дм<sup>3</sup>) и соответствие норме по содержанию Mo, Ba, Al, Ni, Cu, Zn, Sr, Co, Cd и Hg. Вода из колодцев и скважин некоторых фермерских хозяйств пригодна только для технических нужд. К сожалению, исследованная вода используется местным населением и в качестве питьевой. Грунтовую воду данной местности перед употреблением для питьевых нужд необходимо очищать.

Анализ почв показал, что на территории, где проводилось исследование, преобладают сероземовидные почвы легкого грану-

лометрического состава с малым содержанием органического вещества и основных элементов питания растений. Почвы относятся главным образом к карбонатным, встречаются засоленные. Земли в основном используется местным населением как пастбища. В пробах почвы, отобранных в районах горнодобывающих предприятий, отмечаются высокие концентрации Ni, Cu, Zn и As. Их накоплению способствуют карбонатный и сорбционный геохимические барьеры.

В результате проведенных исследований выявлены очаги неблагоприятной экологической ситуации. Они находятся не только на территории горнодобывающих предприятий, но и на угодьях ферм в прилегающих районах. Для выработки природоохранных мероприятий требуются дополнительные геохимические исследования, например, по выявлению содержания токсичных веществ в растительности, продуктах животноводства и их влиянию на здоровье местного населения. Необходимо провести исследования с привлечением профильных специалистов по разработке и обоснованию санитарно-защитных зон предприятий, мероприятий по очистке воды на медедобывающем предприятии. Для питьевых нужд вместо хлорирования можно рекомендовать озонирование воды.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алекин О.А., Семенов А.Д., Скопинцева Б.А.* Руководство по химическому анализу вод суши. Ленинград: Гидрометеиздат, 1973. 269 с.
2. *Ариушкина Е.В.* Руководство по химическому анализу почв. М.: МГУ, 1970. 487 с.
3. *Воробьева И.Б., Власова Н.В.* Физико-химические свойства и термический режим почвогрунтов отвалов угольного разреза // География и природные ресурсы. 2020. № S5. С. 60–66. DOI: [https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2020-5\(60-66\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2020-5(60-66)).
4. *Выркин В.Б., Плюснин В.М., Белозерцева И.А., Шеховцов А.И., Енущенко И.В., Захаров В.В.* Современное состояние природы и экологические проблемы Среднего Прионья // [География и природные ресурсы](#). 2014. № 1. С. 25–35.
5. *Глотова Н.В.* Мониторинг среды обитания. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2006. 22 с.

6. ГОСТ Р 51232-98. Государственный стандарт РФ. Вода питьевая. Общие требования к организации и методам контроля качества. URL: [https://www.ural-gidro.com/upload/files/normdocs/GOST-R-51232-98-\(2002\).pdf](https://www.ural-gidro.com/upload/files/normdocs/GOST-R-51232-98-(2002).pdf).
7. *Ильковская З.Г., Коновалов А.С., Пономарев В.В.* Агрохимические методы исследования почв. М.: Наука, 1975. 656 с.
8. ИСО 11885 (ГОСТ Р 57165-2016). Определение содержания элементов методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой. Национальный стандарт РФ. 2018. URL: <https://www.docs.cntd.ru/document/1200140392>.
9. *Копылова Л.В., Войтюк Е.А., Лескова О.А., Якимова Е.П.* Содержание тяжёлых металлов в почвах и растениях урбанизированных территорий (Восточное Забайкалье). Чита: Забайкал. гос. ун-т., 2013. 154 с.
10. *Мишанина Н.Г., Шишов Л.Л.* Гипсоносные почвы: распространение, генезис, классификация // Почвоведение. 2002. № 3. С. 273–281.
11. *Панкова Е.И., Воробьева Л.А.* Диагностика и критерии оценки засоления почв // Засоленные почвы России / Ред. Л.Л. Шишов. М.: Академкнига, 2006. 854 с.
12. *Панкова Е.И., Конюшкова М.В.* Влияние глобального потепления климата на засоленность почв аридных регионов // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2013. Вып. 71. С. 3–15. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2013-71-3-15>.
13. *Панкова Е.И., Черноусенко Г.И.* Проблема активизации засоления в почвах юга Восточной Сибири и Монголии в связи с аридизацией климата // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2020. Вып. 101. С. 19–45. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-101-19-46>.
14. *Полевой определитель* почв. М.: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 2008. 182 с.
15. *Саэт Ю.Е., Ревич Б.А., Янин Е.П., Смирнова Р.С., Башаркевич И.Л., Онищенко Т.Л., Павлова Л.Н., Трефилова Н.Я., Ачкасов А.И., Саркисян С.Ш.* Геохимия окружающей среды. М.: Недра, 1990. 335 с.
16. СанПиН 1.2.3685–21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. URL: [https://www.ds278-krasnoyarsk-r04.gosweb.gosuslugi.ru/netcat\\_files/19/8/SP123685\\_21\\_0.pdf](https://www.ds278-krasnoyarsk-r04.gosweb.gosuslugi.ru/netcat_files/19/8/SP123685_21_0.pdf).
17. СП 47.13330.2012. Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. Свод правил. URL: <https://www.rnd.armplast-geo.ru/bitrix/document/road%20design/sp-47-13330-2012.pdf>.
18. *Теория и практика химического анализа почв* / под ред. Л.А. Воробьева. М.: ГЕОС, 2006. 399 с.

19. *Шеховцов А.И., Белозерцева И.А.* Экологические проблемы добычи редкоземельных элементов в Юго-Восточном Забайкалье // Успехи современного естествознания. 2016. № 12. С. 222–227.
20. *Шнейзер Г.М., Минеева Л.А.* Руководство по химическому анализу вод. Иркутск: ИГУ, 2006. 55 с.
21. *Экологический мониторинг с участием населения Хотолбор.* Неправительственная организация (НПО) “Монх Грин Галба” / Хамтын Оролцоотой Байгаль Орчны Хяналт шинжилгээ Хотолбор. Монх Ногоон Галба ТББ, 2023. 23 с.
22. *Ecosystems of Mongolia.* Atlas. М.-Ulaanbaatar: Admon Press, 2019. 262 p.
23. ISO 14869. Soil quality – Dissolution for the determination of total element content / Качество почвы. Растворение для определения общего содержания элементов. 2017. URL: <https://www.nd.gostinfo.ru/document/6267384.aspx>.
24. *Kasimov N., Kosheleva N., Gunin P. et al.,* State of the environment of urban and mining areas in the Selenga Transboundary River Basin (Mongolia Russia) // *Environ Earth Sci.* 2016. Vol. 75. 1283. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-016-6088-1>.
25. *National Report.* NSO (Национальное статистическое управление Монголии). URL: <https://www.en.nso.mn/>.
26. *Nyamtseren M., Feng Q., Deo R.* A Comparative Study of Temperature and Precipitation-Based Aridity Indices and Their Trends in Mongolia // *International Journal of Environmental Research and Public Health.* 2018. No. 12. P. 887–899.

## REFERENCES

1. Alekin O.A., Semenov A.D., Skopinceva B.A., *Rukovodstvo po himicheskomu analizu vod sushi* (Handbook of chemical analysis of land waters.), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1973, 269 p.
2. Arinushkina E.V., *Rukovodstvo po himicheskomu analizu pochv* (Handbook of chemical analysis of soils), Moscow: MGU, 1970, 487 p.
3. Vorob'eva I.B., Vlasova N.V., *Fiziko-himicheskie svoystva i termicheskij rezhim pochvogruntov otvalov ugol'nogo razreza* (Hysicochemical properties and thermal regime of soils in open-pit coal mine dumps), *Geografiya i prirodnye rsursy*, 2020, No. S5, pp. 60–66, DOI: [https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2020-5\(60-66\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2020-5(60-66)).
4. Vyrkin V.B., Plyusnin V.M., Belozerceva I.A., Shekhovcov A.I., Enushchenko I.V., Zaharov V.V., *Sovremennoe sostoyanie prirody i ekologicheskie problemy Srednego Prionon'ya* (Current state of nature and

environmental problems of the Srednee Prionon'ye), *Geografiya i prirodnye resursy*, 2014, No. 1, pp. 25–35.

5. Glotova N.V., *Monitoring sredy obitaniya* (Habitat monitoring), Chelyabinsk: Izd-vo YuUrGU, 2006, 22 p.

6. GOST R 51232-98. State standard of the Russian Federation. Drinking water. General requirements for the organization and methods of quality control, URL: [https://www.ural-gidro.com/upload/files/normdocs/GOST-R-51232-98-\(2002\).pdf](https://www.ural-gidro.com/upload/files/normdocs/GOST-R-51232-98-(2002).pdf).

7. Il'kovskaya Z.G., Konovalov A.S., Ponomarev V.V., *Agrohimicheskie metody issledovaniya pochv* (Agrochemical methods for soil investigation), Moscow: Nauka, 1975, 656 p.

8. ISO 11885 (GOST R 57165-2016). Determination of element content by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry. National standard of the Russian Federation, 2018, URL: <https://www.docs.cntd.ru/document/1200140392>.

9. Kopylova L.V., Vojtyuk E.A., Leskova O.A., Yakimova E.P., *Soderzhanie tyazhyolykh metallov v pochvah i rasteniyah urbanizirovannykh territorij (Vostochnoe Zabajkal'e)* (Heavy metal content in soils and plants of urbanized areas (Eastern Transbaikalie)), Chita: Zabajkal. gos. un-t, 2013, 154 p.

10. Mishanina N.G., Shishov L.L., Gipsonosnye pochvy: rasprostranenie, genezis, klassifikaciya (Gypsum application: distribution, genesis, classification), *Pochvovedenie*, 2002, No. 3, pp. 273–281.

11. Pankova E.I., Vorob'eva L.A., Diagnostika i kriterii ocenki zasoleniya pochv (Diagnostics and criteria for assessing soil salinization), In: L.L. Shishov (Ed.) *Zasolennye pochvy Rossii* (Saline soils of Russia), Moscow: Akademkniga, 2006, 854 p.

12. Pankova Ye.I., Konyushkova M.V., The effect of global warming on soil salinity in arid regions, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2013, Vol. 71, pp. 3–15, DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2013-71-3-15>.

13. Pankova E.I., Chernousenko G.I., The problem of salinization activation in soils of the south of Eastern Siberia and Mongolia in connection with climate aridization, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2020, Vol. 101, pp. 19–45, DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-101-19-46>.

14. *Polevoj opredelitel' pochv* (Field soil guide), Moscow: Pochvennyj in-t im. V.V. Dokuchaeva, 2008, 182 p.

15. Saet Yu.E., Revich B.A., Yanin E.P., Smirnova R.S., Basharkevich I.L., Onishchenko T.L., Pavlova L.N., Trefilova N.Ya., Achkasov A.I., Sarkisyan S.Sh., *Geohimiya okruzhayushchej sredy* (Geochemistry of the Environment), Moscow: Nedra, 1990, 335 p.

16. SanPiN 1.2.3685–21. ygienic Standards and Requirements for Ensuring the Safety and (or) Harmlessness of Environmental Factors for Humans, URL:

<https://www.ds278-krasnoyarsk->

[r04.gosweb.gosuslugi.ru/netcat\\_files/19/8/SP123685\\_21\\_0.pdf](https://www.gosweb.gosuslugi.ru/netcat_files/19/8/SP123685_21_0.pdf).

17.SP 47.13330.2012. Engineering Surveys for Construction. Basic Provisions. Code of Practice, URL: <https://www.rnd.armplast-geo.ru/bitrix/document/road%20design/sp-47-13330-2012.pdf>.

18.Vorob'ev L.A. (Ed.), *Teoriya i praktika himicheskogo analiza pochv* (Theory and practice of chemical analysis of soils), Moscow: GEOS, 2006, 399 p.

19. Shekhovcov A.I., Belozerceva I.A., *Ekologicheskie problemy dobychi redkozemel'nyh elementov v Yugo-Vostochnom Zabajkal'e* (Environmental problems of rare earth element mining in Southeastern Transbaikalia), *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, 2016, No. 12, pp. 222–227.

20. Shpejzer G.M., Mineeva L.A., *Rukovodstvo po himicheskomu analizu vod* (Handbook of chemical analysis of waters), Irkutsk: IGU, 2006, 55 p.

21. Environmental monitoring with the participation of the population of Khotolbor. Non-governmental organization (NGO) “Monk Green Galba”, Hamtyn Oroltsootoy Baigal Orchny Khyanalt shinzhilgee Khotolbor. Monk Nagoon Galba, TBB, 2023, 23 p.

22. Ecosystems of Mongolia. Atlas, M.-Ulaanbaatar: Admon Press, 2019, 262 p.

23. ISO 14869. Soil quality – Dissolution for the determination of total element content, 2017, URL: <https://www.nd.gostinfo.ru/document/6267384.aspx>.

24. Kasimov N., Kosheleva N., Gunin P. et al., State of the environment of urban and mining areas in the Selenga Transboundary River Basin (Mongolia Russia), *Environ Earth Sci.*, 2016, Vol. 75, 1283, DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-016-6088-1>.

25. National Report. NSO, URL: <https://www.en.nso.mn/>.

26. Nyamtseren M., Feng Q., Deo R.A., Comparative Study of Temperature and Precipitation-Based Aridity Indices and Their Trends in Mongolia, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2018, No. 12, pp. 887–899.

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2026-127-189-211



**Ссылки для цитирования:**

Смагин А.В., Садовникова Н.Б., Сухоруков С.В., Беляева Е.А., Корчагина К.В., Касимов А.Р. Новый методический подход к автоматизированному мониторингу дыхания почвы в полевых условиях // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2026. Вып. 127. С. 189-211. DOI: 10.19047/0136-1694-2026-127-189-211

**Cite this article as:**

Smagin A.V., Sadovnikova N.B., Sukhorukov S.V., Belyaeva E.A., Korchagina K.V., Kasimov A.R., A new methodical approach to automated monitoring of soil respiration in the field, Dokuchaev Soil Bulletin, 2026, V. 127, pp. 189-211, DOI: 10.19047/0136-1694-2026-127-189-211

**Благодарность:**

Исследование выполнено при поддержке междисциплинарного гранта РФФ № 23-64-10002 (разработка методологии, моделей, приобретение оборудования и реализация высокочастотного С-мониторинга на объекте ИЛАН РАН); литературный обзор и статистическая обработка данных проведены в МГУ в рамках темы № 121040800146-3 государственного задания Минобрнауки РФ “Физические основы экологических функций почв: технологии мониторинга, прогноза и управления”. Также авторы благодарны за оперативное и высокопрофессиональное рецензирование рукописи с ценными замечаниями для ее улучшения.

**Acknowledgments:**

This study was supported by the Russian Science Foundation's interdisciplinary grant No. 23-64-10002 (development of methodology and models, acquisition of equipment, and implementation of high-frequency C-monitoring at the ILAN RAS facility). The literature review and statistical data processing were conducted at Moscow State University as part of the project No. 121040800146-3 of the State Assignment of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation “Physical Foundations of Ecological Functions of Soils: Monitoring, Forecasting, and Management Technologies”. The authors also thank the prompt and highly professional review of the manuscript, which included valuable comments for its improvement.

## Новый методический подход к автоматизированному мониторингу дыхания почвы в полевых условиях

© 2026 г. А. В. Смагин<sup>1,2\*</sup>, Н. Б. Садовникова<sup>1</sup>,  
С. В. Сухоруков<sup>2</sup>, Е. А. Беляева<sup>2</sup>,  
К. В. Корчагина<sup>2</sup>, А. Р. Касимов<sup>3\*\*</sup>

<sup>1</sup>МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия,  
119991, Москва, Ленинские горы, 1, 12

\*<https://orcid.org/0000-0002-3483-3372>, e-mail: [smagin@list.ru](mailto:smagin@list.ru).

<sup>2</sup>Институт лесоведения РАН, Россия,  
143030, МО, Успенское, ул. Советская, 21.

<sup>3</sup>Sultan Qaboos University,  
Al-Khod 123, PO Box 34, Sultanate of Oman,  
\*\*<https://orcid.org/0000-0003-2543-3219>, e-mail: [anvar@squ.edu.om](mailto:anvar@squ.edu.om).

Поступила в редакцию 19.05.2025, после доработки 19.08.2025,  
принята к публикации 27.01.2026

**Резюме:** Актуальность полевого мониторинга почвенного дыхания не вызывает сомнений и определяется значимостью этого процесса в оценке биологической активности почв и углеродного цикла наземных экосистем. Из-за доминирования ручных измерений плохо исследованы закономерности суточной и сезонной динамики почвенного дыхания, особенно в ночные часы и холодное время года. Работа использует новый подход, позволивший полностью автоматизировать полевой мониторинг почвенного дыхания с целью выявления закономерностей его разномасштабной динамики в годовом цикле. Ноу-хау подхода заключалось в использовании периодически продуваемых атмосферным воздухом почвенных камер со встроенными бюджетными CO<sub>2</sub>-логгерами НТ-401/5, регистрирующими динамику концентраций CO<sub>2</sub> каждую минуту. Продувка атмосферным воздухом выводила концентрацию CO<sub>2</sub> в камере на фоновый уровень, после чего компрессор выключался, и логгер записывал тренд накопления CO<sub>2</sub> вследствие почвенного дыхания, использующийся для стандартного расчета потока CO<sub>2</sub> по линейной модели для закрытой камеры. Результаты непрерывного автоматического мониторинга потоков CO<sub>2</sub> на стационарном объекте Института лесоведения РАН в Серебрянборском опытном лесничестве на окультуренной дерново-подзолистой супесчаной почве (loamy sand Cambisol) под посадками голубой ели (*Picea pungens*, Engelm.) в течение

2024–2025 гг. с двумя холодными сезонами показали значимость ночного почвенного дыхания в суточном цикле и дыхания в холодный период года с ноября по март в годовом цикле, а также роль температурного фактора в разномасштабной динамике почвенного дыхания, что представляет интерес для прогнозных эмпирических моделей этого процесса в условиях меняющегося климата.

**Ключевые слова:** диоксид углерода; газообмен почвы; суточная и сезонная динамика; автоматизированный газовый мониторинг; NDIR-газоанализаторы.

## A new methodical approach to automated monitoring of soil respiration in the field

© 2026 A. V. Smagin<sup>1,2\*</sup>, N. B. Sadovnikova<sup>1</sup>, S. V. Sukhorukov<sup>2</sup>,  
E. A. Belyaeva<sup>2</sup>, K. V. Korchagina<sup>2</sup>, A. R. Kacimov<sup>3\*\*</sup>

<sup>1</sup>*Lomonosov Moscow State University,*

*12/1 Leninskie Gori, Moscow 119991, Russian Federation,*

*\*<https://orcid.org/0000-0002-3483-3372>, e-mail: [smagin@list.ru](mailto:smagin@list.ru).*

<sup>2</sup>*Institute of Forest Sciences of the Russian Academy of Sciences,*

*12 Sovetskaya, 143030 Uspenskoe St., Moscow Region, Russian Federation.*

<sup>3</sup>*Sultan Qaboos University,*

*Al-Khod 123, PO Box 34, Sultanate of Oman,*

*\*\*<https://orcid.org/0000-0003-2543-3219>, e-mail: [anvar@squ.edu.om](mailto:anvar@squ.edu.om).*

*Received 19.05.2025, Revised 19.08.2025, Accepted 27.01.2026*

**Abstract:** The relevance of field monitoring of soil respiration is beyond doubt and is determined by the significance of this process in assessing the biological activity of soils and the carbon cycle of terrestrial ecosystems. Due to the dominance of manual measurements, the patterns of daily and seasonal dynamics of soil respiration, especially at night and in the cold season, are poorly understood. The work uses a new approach that allows fully automating field monitoring of soil respiration in order to identify patterns of its multi-scale dynamics in the annual cycle. The know-how of the approach consisted in using soil chambers periodically purged with atmospheric air with built-in low-cost CO<sub>2</sub> loggers HT-401/5, recording the dynamics of CO<sub>2</sub> concentrations every minute. Purging with atmospheric air brought the chamber concentration of CO<sub>2</sub> to the background level, after which the compressor was turned off, and the logger recorded the trend of CO<sub>2</sub> accumulation due to soil respiration, used for the standard calculation of the CO<sub>2</sub> flux according to the linear model for a closed chamber. The results of

continuous automatic monitoring of CO<sub>2</sub> fluxes at the stationary site of the Institute of Forest Science of the Russian Academy of Sciences in the Serebryanobor experimental forestry on cultivated sod-podzolic sandy loam soil (loamy sand Cambisol) under blue spruce (*Picea pungens*, Engelm.) during 2024–2025 with two cold seasons showed the significance of night soil respiration in the daily cycle and respiration in the cold period of the year from November to March in the annual cycle, as well as the role of the temperature factor in multi-scale dynamics of soil respiration, which is of interest for predictive empirical models of this process in a changing climate.

**Keywords:** carbon dioxide; soil gas exchange; daily and seasonal dynamics; automated gas monitoring; NDIR gas analyzers.

## ВВЕДЕНИЕ

Дыхание является неотъемлемым свойством почвы и показателем ее функционирования как динамической биокосной системы. Особую значимость количественные исследования почвенного дыхания приобрели в связи с оценками углеродного цикла природных и антропогенно-измененных экосистем, и в частности, газометрической оценкой их углеродного баланса по соотношению нетто-продуктивности и гетеротрофной составляющей почвенного дыхания (Kudeyarov, 2023; Karelin et al., 2024). Не менее важным направлением, использующим данные о почвенном дыхании, является прогноз вероятной динамики углеродного цикла и возможности секвестрирования углерода той или иной территорией в условиях меняющегося климата, основанный на эмпирических и имитационных моделях, в которых заложены экспериментально оцененные реакции почвенной эмиссии CO<sub>2</sub> на контролируемые метеофакторы (Иванов и др., 2021; Goncharova et al., 2023; Karelin et al., 2024; Kurganova et al., 2003, 2023). Однако адекватность газометрической оценки углеродного баланса наземных экосистем определяется множеством не решенных полностью к настоящему моменту методических задач, среди которых выделим суточную и сезонную динамику почвенного дыхания (Карелин и др., 2019). Доминирование ручных измерений эмиссии CO<sub>2</sub> камерным методом практически исключало учет суточной динамики этого процесса, особенно в ночное время, вместо чего некоторые известные специалисты по почвенному дыханию рекомендовали замеры в утренние часы, когда, с их точки зрения, поток

CO<sub>2</sub> из почвы должен равняться среднесуточному, что следовало из одной единственной методической работы на эту тему для серых лесных почв (см., например, Kurganova et al., 2003). Для оценки сезонной динамики в столь же трудоемких ручных измерениях считалось достаточным (репрезентативным) оценивать почвенное дыхание раз в неделю (декаду) или реже (Gorbov et al., 2023; Kurganova et al., 2003, 2023), что, на наш взгляд, сомнительно с учетом сильного потенциального варьирования за такой срок температуры, осадков и иных контролирующих эмиссию CO<sub>2</sub> почвенно-климатических факторов.

Современные технические средства автоматизации эксперимента в принципе позволяют решать задачи высокочастотного непрерывного мониторинга эмиссии парниковых газов почвами, однако и здесь есть некоторые затруднения. Известная техника полностью автоматизированного сезонного мониторинга газообмена почвы и атмосферы с почасовыми замерами потоков на базе камер с раскрывающимися для вентиляции створками (см., например, Masterpanov et al., 2008) использует дорогостоящее оборудование и проблемна в холодное время года из-за механической нагрузки льда и снега на раздвижные поверхности камер. Альтернативный подход – продувка закрытых стационарных камер атмосферным воздухом (Молчанов, 2015; Молчанов и др., 2017; Smagin et al., 2025). В большинстве случаев для регистрации газовых потоков при этом используется методика динамических камер (Смагин, 2005; Молчанов, 2015). В такие камеры компрессором подается воздух с точно измеряемым расходом, и через газовые коммуникации (ПВХ или силиконовые шланги) этот воздух попадает в расположенный неподалеку газоанализатор (обычно система Li-COR), детектирующий динамику концентрации CO<sub>2</sub> в камере на фоне его содержания в атмосферном воздухе. Серьезными проблемами такого метода являются необходимость непрерывного и точного контроля расхода воздуха, продувающего камеру, а также неизбежное и плохо поддающееся точной оценке разбавление CO<sub>2</sub>, выделяемого в камере, воздухом газовых коммуникаций, соединяющих камеры со стационарным газоанализатором. Появление бюджетных NDIR-газоанализаторов CO<sub>2</sub> с функцией логгеров для мониторинга качества воздуха открыло перспективу

принципиально иного подхода, а именно: помещения такого анализатора непосредственно в закрытую камеру с периодической продувкой атмосферным воздухом для поддержания фоновых значений концентрации  $\text{CO}_2$ . Такая технология впервые была предложена нами в работе (Smagin et al., 2025) для измерений почвенного дыхания и газообмена древесных насаждений с атмосферой с целью оценки локального углеродного баланса элемента городской зеленой инфраструктуры. Данная статья детализирует исследования почвенного дыхания на основе нового методического подхода на том же объекте с целью более дробной (раз в час) оценки закономерностей суточной и сезонной динамики данного процесса под воздействием гидротермических факторов в течение 1.5-летнего цикла непрерывного автоматизированного мониторинга.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Круглогодичный непрерывный мониторинг почвенного дыхания проводился с ноября 2023 по май 2025 гг., на территории Серебряноборского опытного лесничества ИЛАН РАН (Западный административный округ Москвы; 55.77090274 N, 37.39450062 E) в декоративных приусадебных посадках голубой ели (*Picea pungens*, Engelm.) 35-летнего возраста на окультуренной дерново-подзолистой супесчаной почве (loamy sand Cambisol). Почвенные камеры – изоляторы полусферической формы из закаленного стекла с подводом через почву газовых и электрических коммуникаций – располагались в трехкратной повторности в мертвопокровной парцелле под кроной ели. В камеры помещались NDIR-газоанализаторы НТ-401/5 (НТi, Китай) цилиндрической формы диаметром 10 и высотой 3 см с функцией автоматической регистрации объемного содержания  $\text{CO}_2$  (диапазон измерений 0–9999 ppm с разрешающей способностью 1 ppm, относительной погрешностью 3% и временем отклика датчика менее 30 секунд) с объемом памяти 12 700 измерений, достаточным для поминутной регистрации  $\text{CO}_2$  в течение недели. Раз в неделю показания считывались на нетбук, и логгеры перезапускались на новую запись. Камеры работали в режиме периодической продувки атмосферным воздухом через подведенные ПВХ шланги от воздушного

компрессора (Sera AIR 275 Rplus, Германия). Цикл продувки атмосферным воздухом длился 45 минут, после чего таймер отключал компрессор на такой же период для регистрации трендов накопления диоксида углерода в процессе почвенной эмиссии.

Расчет эмиссионных потоков CO<sub>2</sub> по приросту объемного содержания газа в камере за единицу времени ( $\Delta X$ , ppm/мин) осуществлялся с использованием следующей формулы на основе уравнения Менделеева-Клапейрона для идеального газа (Смагин, 2005):

$$F = \frac{60 \cdot \Delta X \cdot P_a \cdot M \cdot h}{R \cdot T}, \quad (1)$$

где  $F$ , мгС/(м<sup>2</sup>·час) – поток газа в углеродных единицах;  $P_a$ , кПа – барометрическое атмосферное давление;  $M = 12$  г/моль – молярная масса углерода;  $h$ , м – эффективная высота камеры (отношение объема к площади основания);  $R = 8.314$  Дж/(моль·К) – универсальная газовая постоянная;  $T$ , К – абсолютная температура.

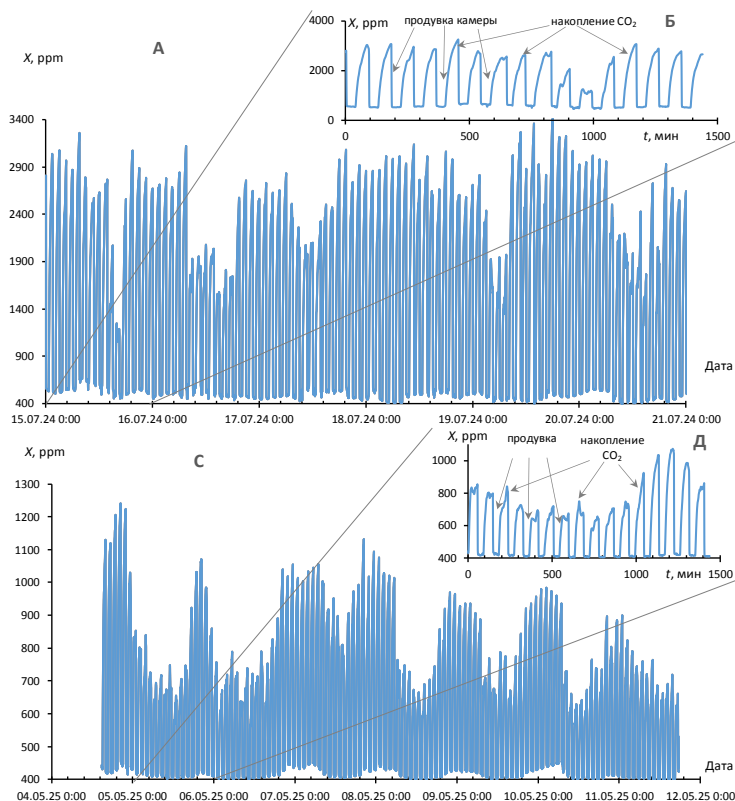
Необходимая информация о температуре и атмосферном давлении, наряду с относительной влажностью воздуха, получалась синхронно с использованием автоматических логгеров DS1923 (США) и портативной метеостанции NicetyMeter-0371 (Китай). Более подробная характеристика объекта исследования и новой методики оценки газовых потоков приведена в предшествующей публикации (Smagin et al., 2025). Математическая и статистическая обработка данных осуществлялась в программах S-Plot 11 (Германия) и R 3.5.3 (США); для численного интегрирования потоков применены макросы Excel (автор М.В. Глаголев).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 1 представлены фрагменты недельных записей динамики концентраций CO<sub>2</sub> в периодически продуваемой почвенной камере в июле 2024 и мае 2025 гг.

Форма регистрируемых кривых в виде регулярных колебаний отражает периодичность накопления CO<sub>2</sub> в камере и его удаления при продувке атмосферным воздухом до фонового уровня порядка 400 ppm. Высота пиков, являющаяся показателем интен-

сивности аккумуляции  $\text{CO}_2$ , меняется как в течение суток, так и между днями и месяцами с наибольшей интенсивностью (до 3 000–3 500 ppm за 45 мин.) в летнее время. Максимумы и минимумы высоты, хорошо видные на графиках недельной динамики, не имели какой-либо четкой приуроченности ко времени суток и встречались как в дневные, так и в ночные часы.

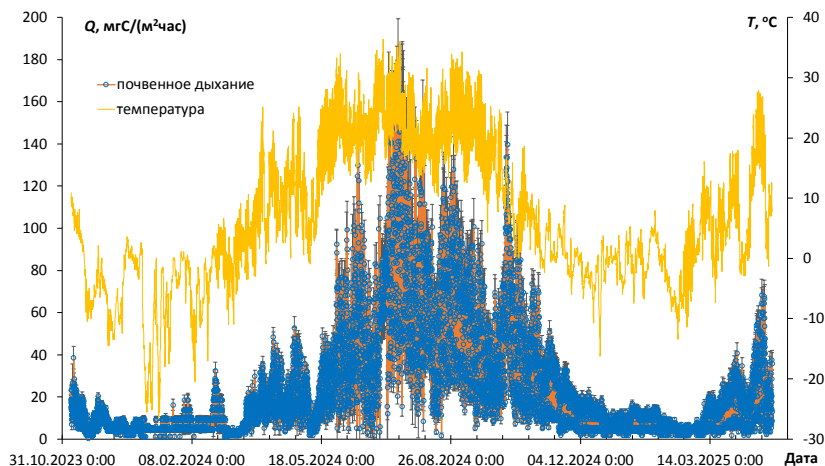


**Рис. 1.** Примеры динамики концентраций  $\text{CO}_2$  ( $X$ , ppm) в почвенной камере в июле 2024 г. (А, Б) и мае 2025 г. (С, Д); на врезках (Б, Д) показаны фрагменты суточного цикла.

**Fig. 1.** Examples of the dynamics of  $\text{CO}_2$  concentrations ( $X$ , ppm) in the soil chamber in July 2024 (А, Б) and May 2025 (С, Д); the insets (Б, Д) show fragments of the daily cycle.

Фрагменты динамики на врезках (рис. 1 Б, Д) показывают детально “зазубренную” форму пиков с постепенным снижением темпов прироста  $\text{CO}_2$  к концу 45-минутного интервала экспозиции камеры до ее продувки атмосферным воздухом. Такое снижение хорошо предсказывается кинетической теорией камерно-статического метода оценки почвенного дыхания с выводом о целесообразности расчетов эмиссионных потоков по начальным (линейным) трендам или по касательной к нелинейному тренду в начальной точке измерений при  $t = 0$  (см., например, Smagin, 2015). В этой связи алгоритмизация расчета потоков по трендам динамики концентраций в периодически продуваемой камере остается не до конца решенной методической задачей, возможно, требующей в дальнейшем привлечения AI-технологий. Ручная обработка данных с построением линейных трендов или с использованием метода касательных, обычная для спорадических исследований почвенного дыхания, очевидно, невозможна, так как за неделю только в одной камере собирается информация о 10–13 тыс. измерений. Мы использовали простейший алгоритм, описанный в предшествующей работе (Smagin et al., 2025), с расчетом по мгновенным инкрементам  $\Delta X$  за минутный (минимальный) интервал измерений с логическим выбором положительных значений  $\Delta X$  на базе стандартных функций Excel. Отрицательные значения, возникающие на этапе продувки камеры, при этом элиминировались с записью пустой ячейки так, чтобы исключить их из дальнейшей статистической обработки. Для алгоритмизации расчета потоков по наиболее правильным начальным значениям прироста концентрации в камере осреднение за час производилось с использованием не средних, а верхне-квартильных оценок (функция Excel “третий квартиль”).

Полученные по такому алгоритму почасовые потоки за весь 1.5-годовой период исследований с последующим усреднением по повторностям (общий массив данных более 39 тыс. значений) и оценкой доверительных интервалов приведены на рисунке 2. Анализ данных показывает хорошо известную в почвоведении сезонную динамику эмиссии  $\text{CO}_2$ , во многом связанную с ходом температуры воздуха.

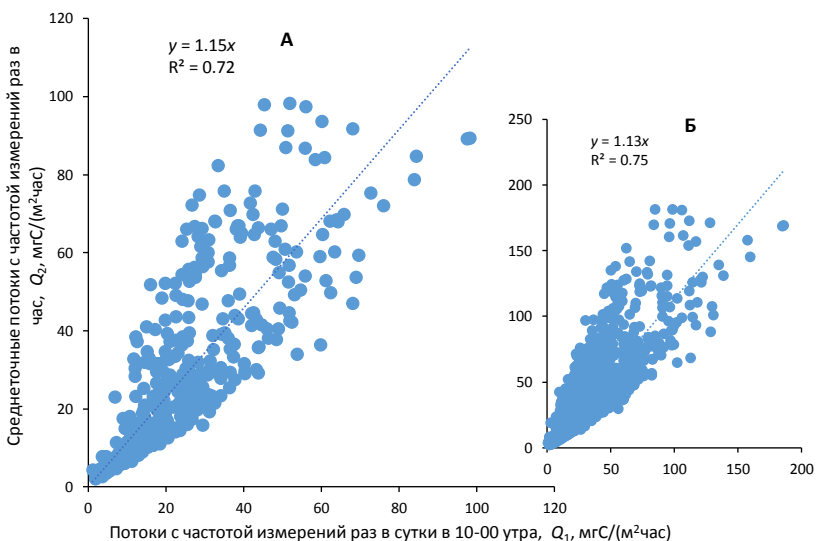


**Рис. 2.** Осредненные почасовые эмиссионные потоки  $\text{CO}_2$  за весь период измерений с ноября 2023 г. по май 2025 г. в связи с синхронной почасовой динамикой температуры воздуха (здесь и далее вертикальные планки – доверительные интервалы при  $p = 0.05$ ).

**Fig. 2.** Averaged hourly emission fluxes of  $\text{CO}_2$  for the entire measurement period from November 2023 to May 2025 in connection with the synchronous hourly dynamics of air temperature (hereafter vertical bars are confidence intervals at  $p = 0.05$ ).

Наибольшие значения почасовых потоков в интервале 100–200  $\text{mgC}/(\text{m}^2 \cdot \text{час})$  приходятся на летнее время с центральным максимумом в июле. Почти симметрично этому максимуму расположены всплески почвенного дыхания в июле и октябре. Последнее, по-видимому, может быть объяснено спецификой 2024 г. с затяжным теплым периодом (температуры воздуха 15–20 °C и более) вплоть до ноября. Минимальные потоки в 1–20  $\text{mgC}/(\text{m}^2 \cdot \text{час})$  отмечаются в зимний период (декабрь–февраль), причем даже при отрицательных температурах воздуха камеры регистрировали эмиссию  $\text{CO}_2$ , а в оттепели, особенно характерные для декабря–января аномально теплой зимы 2025 г., потоки в 15–20  $\text{mgC}/(\text{m}^2 \cdot \text{час})$  были достаточно распространенным явлением.

Особый интерес представляет возможность проверки с помощью круглогодичного высокочастотного (раз в час) мониторинга некоторых закрепившихся в науке о почвах методических положений касательно репрезентативности измерений почвенного дыхания в суточном и сезонном циклах. Рисунок 3 иллюстрирует проверку гипотезы (Kurganova et al., 2003) об отражении утренними измерениями почвенного дыхания среднесуточной эмиссии  $\text{CO}_2$ .



**Рис. 3.** Сравнение значений реальных среднесуточных потоков с измерениями эмиссии  $\text{CO}_2$  раз в сутки в 10 утра за весь период наблюдений (**А** – осредненные по повторностям значения, **Б** – все значения).

**Fig. 3.** Comparison of actual average daily flows with measurements of  $\text{CO}_2$  emissions once a day at 10 am for the entire observation period (**A** – values averaged over repetitions, **B** – all values).

Несмотря на достаточно высокие коэффициенты корреляции ( $R = 0.85\text{--}0.87$ ) и угловые коэффициенты линейной регрессии для сравниваемых показателей ( $a = 1.13\text{--}1.15$ ), близкие к единице, по

Графикам видно, что расхождения между сравниваемыми показателями могут быть весьма высокими и достигать 40–90% как в сторону занижения относительно реальных среднесуточных потоков, так и в сторону их завышения при распространенной оценке раз в сутки в утренние часы. Особенно сильные расхождения и соответствующие ошибки в оценке среднесуточных величин эмиссии  $\text{CO}_2$  возникают в теплый период года с относительно высокими потоками порядка  $100 \text{ мгС}/(\text{м}^2 \cdot \text{час})$  и более. Этот результат хорошо виден по веерообразному расположению данных на рисунке 3 с сильным расхождением по мере увеличения значений сравниваемых потоков. Осредненная по всему массиву данных оценка по линейной регрессии с коэффициентами  $a = 1.13\text{--}1.15$  указывает на систематическое занижение на 11–13% реальных потоков  $\text{CO}_2$  с использованием разовых утренних замеров почвенного дыхания.

Сходная ситуация возникает и для другого масштаба – сезонной динамики эмиссионных потоков (рис. 4). Здесь традиционно используемая в большинстве исследований почвенного дыхания экстраполяция замеров раз в неделю или декаду на весь месяц также приводит к систематическому занижению среднемесячных оценок на 14–15%, если руководствоваться полученными за весь период мониторинга линейными регрессиями сравниваемых показателей с угловыми коэффициентами  $a = 1.16\text{--}1.17$ . Однако спорадические отклонения от реальных оценок, как и в случае суточной динамики, здесь могут быть весьма высокими и достигать 40–50%. При этом в холодный период года с небольшими потоками  $\text{CO}_2$  – до  $20 \text{ гС}/(\text{м}^2 \cdot \text{мес.})$  – экстраполяция на месяц разовых оценок, как правило, приводит к переоценке почвенной эмиссии на 10–50%, а в теплый период с потоками в диапазоне  $40\text{--}80 \text{ гС}/(\text{м}^2 \cdot \text{мес.})$  нередко наблюдается недооценка реальных потоков до 10–40%. Общая тенденция занижения среднемесячных потоков при традиционной экстраполяции оценок раз в неделю на весь месяц определяется, очевидно, более высоким вкладом теплого сезона в годовую эмиссию.



а возможно, и феномен “неучтенного стока” углерода (Kudeyarov, 2023) в целом.

Результаты высокочастотного мониторинга почвенного дыхания позволили репрезентативно оценить влияние гидротермических факторов на эмиссию  $\text{CO}_2$  за весь период наблюдений в виде соответствующих эмпирических моделей. Рисунок 5 иллюстрирует влияние почасовой температуры воздуха. Оно соответствует общепринятым представлениям в данной области, а именно, экспоненциальной эмпирической связи между температурой и плотностью потока  $\text{CO}_2$ , к которой могут быть сведены известные функции “Q10”, Аррениуса и ряд других моделей (Смагин, 2005; Kurganova et al., 2003). Однако высокое варьирование данных, особенно в теплое время года с потоками от 50–100  $\text{mgC}/(\text{m}^2 \cdot \text{час})$  и выше, дает относительно низкие коэффициенты детерминации ( $R^2$ ) для экспоненциальной модели – в диапазоне 0.48–0.54 со стандартными ошибками  $s = 19\text{--}28 \text{ mgC}/(\text{m}^2 \cdot \text{час})$ , существенно превышающими большинство доверительных интервалов экспериментальных оценок моделируемого показателя.

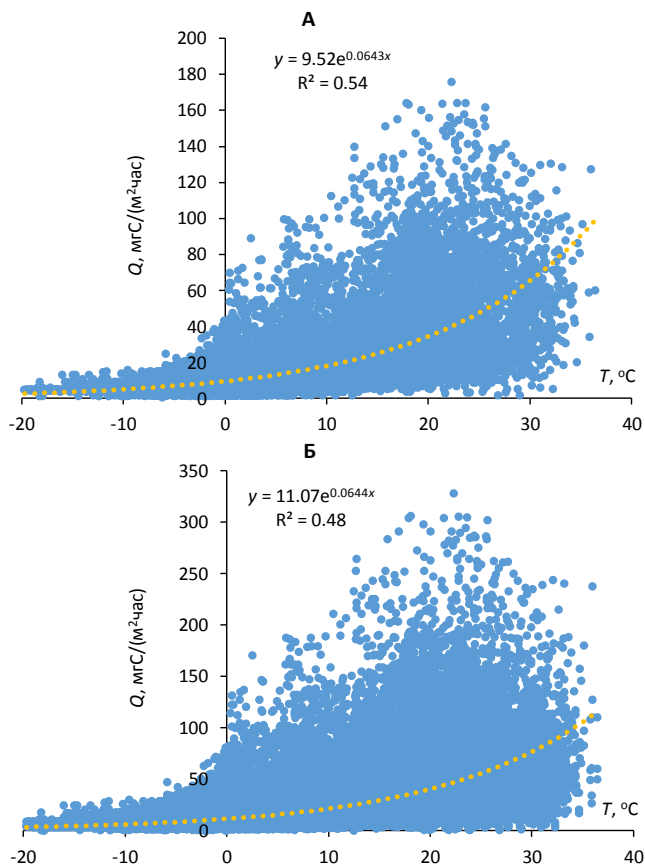
Учет еще одного контролирующего фактора – относительной влажности воздуха ( $RH$ , %) – улучшает модельный прогноз почвенного дыхания (рис. 6). С этой целью мы модифицировали стандартную модель нормального двумерного распределения Гаусса для переменных температуры и влажности воздуха, редуцировав ее с пяти- до трехпараметрической:

$$F = F_{\max} \exp \left( -0.5 \cdot \left( \left( \frac{T - T_{\max}}{T_0} \right) + \left( \frac{RH - 100}{RH_0} \right) \right) \right), \quad (2)$$

где  $F$ ,  $\text{mgC}/(\text{m}^2 \cdot \text{час})$  – моделируемый эмиссионный поток;  $F_{\max} = 183 \pm 2 \text{ mgC}/(\text{m}^2 \cdot \text{час})$ , его максимальное значение;  $T_0 = 20.6 \pm 0.2 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_{\max} = 48.1 \pm 0.4 \text{ }^\circ\text{C}$  – эмпирические константы, определяемые по экспериментальным данным, тогда как  $RH_0$  можно положить равной 50 без ущерба для адекватности модели (2). Все три параметра модели статистически достоверны на уровне  $p < 0.0001$ .

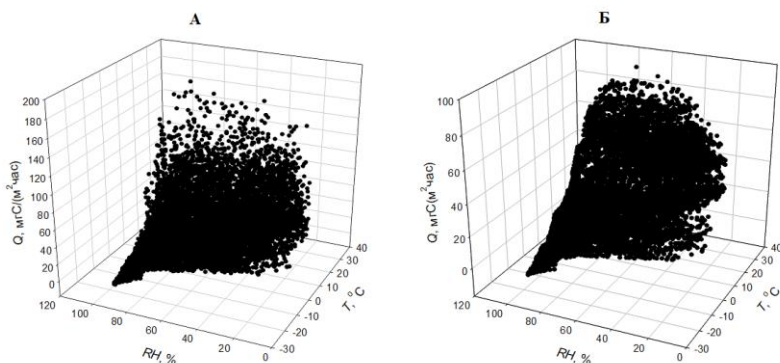
Ее использование вместо чисто температурной модели позволило снизить стандартную ошибку для всего массива данных

(13 тыс. оценок) в 1.8 раза ( $s = 16 \text{ мгС}/(\text{м}^2 \cdot \text{час})$ ) и повысить коэффициент детерминации ( $R^2 = 0.57$ ).



**Рис. 5.** Влияние температуры воздуха на почасовые эмиссионные потоки  $\text{CO}_2$  (А – осредненные по повторностям значения, Б – все значения, 39 тыс. измерений).

**Fig. 5.** The influence of air temperature on hourly emission fluxes of  $\text{CO}_2$  (А – values averaged over repetitions, Б – all values, 39 thousand measurements).



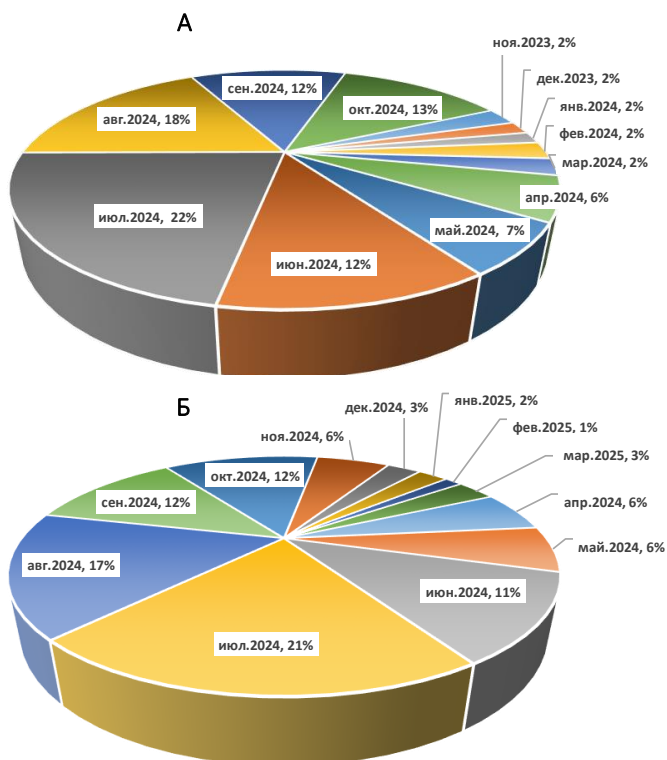
**Рис. 6.** Реальные (А) и предсказанные по эмпирической модели (Б) среднестатистические почасовые эмиссионные потоки CO<sub>2</sub> за весь период наблюдений (13 тыс. измерений).

**Fig. 6.** Real (А) and predicted by the empirical model (Б) average statistical hourly emission flows of CO<sub>2</sub> for the entire observation period (13 thousand measurements).

Гидротермические факторы контролируют более 50% дисперсии полученных высокочастотным мониторингом данных эмиссии CO<sub>2</sub>, но, на наш взгляд, этого недостаточно, чтобы корректно прогнозировать отклик почвенного дыхания на климатические изменения без выявления причины оставшихся 40–50% дисперсии.

Завершающий рисунок 7 иллюстрирует распределение вкладов разных месяцев в общегодовое почвенное дыхание, оцененное численным интегрированием почасовых потоков за периоды с ноября 2023 г. по октябрь 2024 г. и с апреля 2024 г. до марта 2025 г. включительно. Как видно, 50% общегодового потока формируются в летние месяцы с доминированием вкладов июля и августа (17–22%) и меньшим вкладом июня (11–11%). Зимние месяцы (декабрь–февраль) дают вклады не более 2–3% каждый и в сумме не более 6% от годового потока. Доля эмиссии с марта по май увеличивается от 2–3% до 6–7% с суммарным вкладом весны

до 15%. Для осенних месяцев максимальна у сентября и октября (12–13%) и минимальна у ноября (2–6%), но в сумме осень дает почти вдвое больший вклад, чем весна (до 30% годовой эмиссии CO<sub>2</sub>), что может быть связано не только с текущей биологической активностью в теплые осенние месяцы, но и с выходом ранее накопленного в почвенной толще CO<sub>2</sub>.



**Рис. 7.** Вклад разных месяцев года в суммарную годовую эмиссию CO<sub>2</sub> (А – расчет с ноября 2023 г. по октябрь 2024 г., Б – расчет с апреля 2024 г. по март 2025 г.).

**Fig. 7.** Contribution of different months of the year to the total annual CO<sub>2</sub> emission (А – calculation from November 2023 to October 2024, Б – calculation from April 2024 to March 2025).

Суммарный вклад холодного сезона с ноября по апрель включительно не превышает 16–21%, что ниже, чем оценки в 30% и более из указанных источников (Пулы..., 2007; Kudayarov, 2023), несмотря на аномально теплый зимний сезон 2024–2025 гг. Возможно, систематическое завышение реальных оценок почвенного дыхания при традиционных спорадических измерениях раз в неделю для холодного периода (рис. 4) приводит к переоценке его роли в годовой эмиссии CO<sub>2</sub>.

При рецензировании статьи было высказано пожелание сравнить измерения новой технологии с условным “эталонном” в виде одной из широко используемых международным научным сообществом коммерческих систем для полевого исследования почвенного дыхания. На рисунке 1А в Приложении к статье мы проводим такое сравнение разовых измерений для некоторых почвенных объектов Серебряноборского опытного лесничества ИЛАН РАН от песков к хвойной подстилке, выполненных двумя нашими камерами с датчиками НТ-401/5 и рекомендованной для исследований на карбоновых полигонах коммерческой системой LiCOR с газоанализатором Li-7810 и камерой Smart Chamber, осуществленных в двукратной повторности. Для удобства сравнения показания наших камер были переведены в мкмоль/(м<sup>2</sup>·с). Как видно, при обычных потоках, до 3–4 мкмоль/(м<sup>2</sup>·с) (450–650 мгСО<sub>2</sub>/(м<sup>2</sup>·ч)), показания практически тождественны. Однако при более высоких значениях появляются расхождения, причем, как в сторону завышения, так и занижения новой системой относительно “эталонной”. Несмотря на общее хорошее соответствие (линейная регрессия с коэффициентом детерминации 0.97 и угловым коэффициентом  $1.027 \pm 0.056$ , достоверным при  $p\text{-value} < 0.0001$ ), выявленное для конкретного объекта, пока рано говорить о каких либо статистически достоверных отличиях или их отсутствии. Это должно быть отдельное исследование на представительном материале с разными почвами и переменными факторами, контролирующими почвенное дыхание. При этом прецизионность оценки концентраций CO<sub>2</sub> дорогостоящих коммерческих систем с периодической поверкой точности по эталонным газовым смесям может оказаться излишней, поскольку в расчетах потоков важны не абсолютные значения, а их изменения (приросты) кон-

центраций. И для этого вполне достаточно встроенная в анализаторах качества воздуха помещений типа HT-401/5 опция поверки по чистому атмосферному воздуху с условным содержанием  $\text{CO}_2$  в 400 ppm. Также простая технологическая идея встраивания таких датчиков в камеры снимает необходимость контроля скорости воздушных потоков и соответствующих поправок на давление, заложенных в коммерческие системы с дорогими, а поэтому внешними по отношению к камере газоанализаторами. И в будущем камеры со встроенными датчиками  $\text{CO}_2$  и периодической продувкой могут стать бюджетной альтернативой дорогостоящим коммерческим системам, не уступающим им в качестве полевой оценки почвенного дыхания.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Новый методический подход, заключающийся в использовании периодической продувки закрытых камер со встроенными бюджетными NDIR-логгерами  $\text{CO}_2$ , позволил полностью автоматизировать трудоемкий процесс мониторинга почвенного дыхания с высокочастотной (раз в час) оценкой эмиссии  $\text{CO}_2$  за 1.5-летний период с ноября 2023 г. по май 2025 г. на участке окультуренной дерново-подзолистой супесчаной почвы Серебряноборского опытного лесничества ИЛАН РАН. Анализ данных выявил закономерности суточной и сезонной динамик почвенного дыхания и вероятность нерепрезентативности оценок среднесуточных и среднемесячных величин эмиссии  $\text{CO}_2$  по распространенной методологии спорадических измерений в утренние часы раз в неделю с систематическим занижением расчетных потоков относительно реальных. Этот методологический вывод имеет значение для корректной оценки углеродного баланса экосистем во избежание искусственного завышения С-стока из-за недооценки реальных закономерностей разномасштабной динамики почвенного дыхания.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Иванов А.Л., Савин И.Ю., Столбовой В.С., Духанин Ю.А., Козлов Д.Н.* Методологические подходы формирования единой Национальной системы мониторинга и учета баланса углерода и выбросов парниковых

- газов на землях сельскохозяйственного фонда Российской Федерации // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2021. Вып. 108. С. 175–218. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2021-108-175-218>.
2. Карелин Д.В., Азовский А.И., Куманяев А.С., Замолодчиков Д.Г., Суховеева О.Э. Значение пространственного и временного масштаба при анализе факторов эмиссии CO<sub>2</sub> из почвы в лесах Валдайской возвышенности // Лесоведение. 2019. № 1. С. 29–37. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0024114819010078>.
3. Молчанов А.Г. Газообмен сфагнома при разных уровнях поверхностных грунтовых вод // Экология. 2015. № 3. С. 182–188. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0367059715030063>.
4. Молчанов А.Г., Курбатова Ю.А., Ольчев А.В. Влияние сплошной вырубki леса на эмиссию CO<sub>2</sub> с поверхности почвы // Известия РАН. Сер. Биол. 2017. № 2. С. 190–196. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0002332916060126>.
5. Пулы и потоки углерода в наземных экосистемах России / Под ред. Заварзина Г.А, Кудеярова В.Н. М.: Наука, 2007. 315 с.
6. Смагин А.В. Газовая фаза почв. М.: Изд-во Моск. Ун-та, 2005. 301 с.
7. Goncharova O.Yu., Matyshak G.V., Timofeeva M.V., Chuvanov S.V., Tarkhov M.O., Isaeva A.V. Carbon Dioxide Emission from Soils of the Ecotone Zone in the North of Western Siberia // Eur. Soil Sci. 2023. Vol. 56. No. 9. P. 1210–1222. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229323601257>.
8. Gorbov S.N., Vasenev V.I., Minaeva E.N., Tagiverdiev S.S., Skripnikov P.N., Bezuglova O.S. Short-Term Dynamics of CO<sub>2</sub> Emission and Carbon Content in Urban Soil Constructions in the Steppe Zone // Eur. Soil Sci. 2023. Vol. 56. No. 9. P. 1270–1280. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229323601282>.
9. Karelin D.V., Zolotukhin A.N., Ryzhkov O.V., Lunin V.N., Zamolodchikov D.G., Sukhoveeva O.E. Use of Long-Term Soil Respiration Measurements for Calculating the Net Carbon Balance in Ecosystems of the Central Chernozemic Region // Eur. Soil Sci. 2024. Vol. 57. No. 10. P. 1638–1649. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229324601318>.
10. Kudeyarov V.N. Soil Respiration and Carbon Sequestration: A Review // Eur. Soil Sci. 2023. Vol. 56. No. 9. P. 1191–1200. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229323990012>.
11. Kurganova I., Lopes de Gerenyu V., Rozanova L., Sapronov D., Myakshina T., Kudeyarov V. Annual and seasonal CO<sub>2</sub> fluxes from Russian southern taiga soils // Tellus B: Chemical and Physical Meteorology. 2003. Vol. 2. P. 338–344. DOI: <https://doi.org/10.3402/tellusb.v55i2.16724>.
12. Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.O., Myakshina T.N., Sapronov D.V., Khoroshaev D.A., Ableeva V.A. Temperature Sensitivity of Soil Respiration in

Grasslands in Temperate Continental Climate Zone: Analysis of 25-Year-Long Monitoring Data // *Eur. Soil Sci.* 2023. Vol. 56. No. 9. P. 1232–1246. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229323601130>.

13. Mastepanov M., Sigsgaard Ch., Dlugokencky E.J., Houweling S., Strum E. Large tundra methane burst during onset of freezing // *Nature*. 2008. Vol. 456. No. P. 628–631. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature07464>.

14. Smagin A.V. Kinetic assessment of gas exchange between the soil and the atmosphere by the static chamber method // *Eur. Soil Sci.* 2015. Vol. 48. No. 7. P. 719–725. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229315070108>.

15. Smagin A.V., Sadovnikova N.B., Sukhorukov S.V., Belyaeva E.A. High-frequency CO<sub>2</sub> monitoring of the soil and vegetation gas exchange with the atmosphere to assess the local carbon balance of a green infrastructure element // *Eur. Soil Sci.* 2025. Vol. 58. No. 62. P. 1–15. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229324603639>.

## REFERENCES

1. Ivanov A.L., Savin I.Yu., Stolbovoy V.S., Dukhanin Yu.A., Kozlov D.N., Methodological approaches to the formation of a unified national system of monitoring and accounting of carbon balance and greenhouse gas emissions on lands of the agricultural fund of the Russian Federation, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2021, Vol. 108, pp. 175–218, DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2021-108-175-218>.

2. Karelin D.V., Azovsky A.I., Kumanyaev A.S., Zamolodchikov D.G., Sukhoveeva O.E., Znacheniyе prostranstvennogo i vremennogo masshtaba pri analize faktorov emissii CO<sub>2</sub> iz pochvy v lesakh Valdayskoy vozvysheynosti. (The importance of spatial and temporal scale in the analysis of CO<sub>2</sub> emission factors from soils in the forests of the Valdai Upland), *Lesovedenie*, 2019, No. 1, pp. 29–37, DOI: <https://doi.org/10.1134/S0024114819010078>.

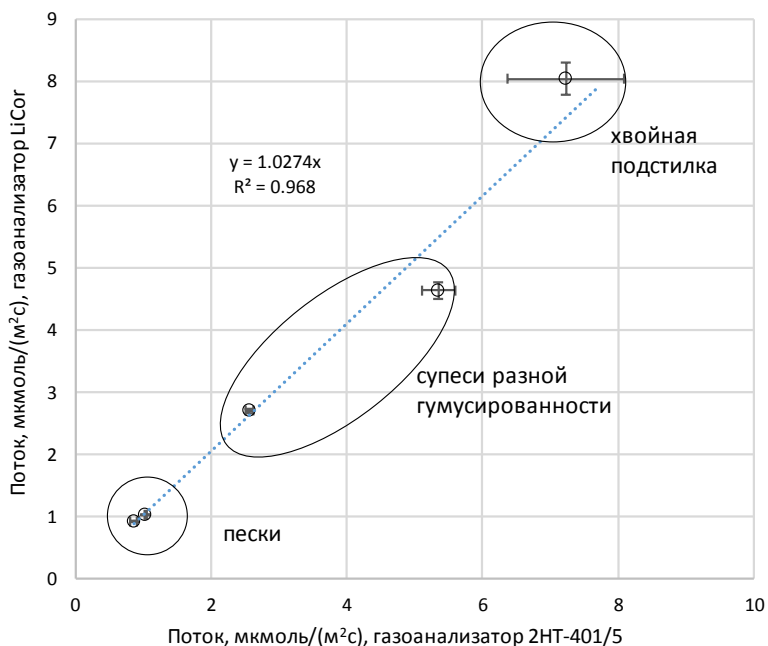
3. Molchanov A.G., Gazoobmen sfagnuma pri raznykh urovnyakh poverkhnostnykh gruntovykh vod. (Gas exchange of sphagnum at different levels of surface groundwater), *Ekologiya*, 2015, No. 3, pp. 182–188, DOI: <https://doi.org/10.7868/S0367059715030063>.

4. Molchanov A.G., Kurbatova YU.A., Ol'chev A.V., Vliyaniye splshnoy vyrubki lesa na emissiiyu CO<sub>2</sub> s poverkhnosti pochvy. (The influence of clear-cutting of forests on CO<sub>2</sub> emissions from the soil surface), *Izvestiya RAN. Ser. Biol.*, 2017, No. 2, pp. 190–196, DOI: <https://doi.org/10.7868/S0002332916060126>.

5. Zavarzin G.A., Kudeyarov V.N. (Eds.), *Puly i potoki ugleroda v nazemnykh ekosistemakh Rossii* (Pools and flows of carbon in terrestrial ecosystems of Russia), Moscow: Nauka, 2007, 315 p.

6. Smagin A.V., *Gazovaya faza pochv* (Gas phase of soils), Moscow: Moscow State University, 2005, 301 p.
7. Goncharova O.Yu., Matyshak G.V., Timofeeva M.V., Chuvanov S.V., Tarkhov M.O., Isaeva A.V., Carbon Dioxide Emission from Soils of the Ecotone Zone in the North of Western Siberia, *Eur. Soil Sci.*, 2023, Vol. 56, No. 9, pp. 1210–1222, DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229323601257>.
8. Gorbov S.N., Vasenev V.I., Minaeva E.N., Tagiverdiev S.S., Skripnikov P.N., Bezuglova O.S., Short-term dynamics of CO<sub>2</sub> emission and carbon content in urban soil constructions in the steppe zone, *Eur. Soil Sci.*, 2023, Vol. 56, No. 9, pp. 1270–1280, DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229323601282>.
9. Karelin D.V., Zolotukhin A.N., Ryzhkov O.V., Lunin V.N., Zamolodchikov D.G., Sukhoveeva O.E., Use of long-term soil respiration measurements for calculating the net carbon balance in ecosystems of the Central Chernozemic Region, *Eur. Soil Sci.*, 2024, Vol. 57, No. 10, pp. 1638–1649, DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229324601318>.
10. Kudiyarov V.N., Soil respiration and carbon sequestration: A Review, *Eur. Soil Sci.*, 2023, Vol. 56, No. 9, pp. 1191–1200, DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229323990012>.
11. Kurganova I., Lopes de Gerenyu V., Rozanova L., Saponov D., Myakshina T., Kudiyarov V., Annual and seasonal CO<sub>2</sub> fluxes from Russian southern taiga soils, *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 2003, Vol. 2, pp. 338–344, DOI: <https://doi.org/10.3402/tellusb.v55i2.16724>.
12. Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.O., Myakshina T.N., Saponov D.V., Khoroshaev D.A., Ableeva V.A., Temperature sensitivity of soil respiration in grasslands in temperate continental climate zone: Analysis of 25-year-long monitoring data, *Eur. Soil Sci.*, 2023, Vol. 56, No. 9, pp. 1232–1246, DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229323601130>.
13. Mastepanov M., Sigsgaard Ch., Dlugokencky E.J., Houweling S., Strum E., Large tundra methane burst during onset of freezing, *Nature*, 2008, Vol. 456, No. 7288, pp. 628–631, DOI: <https://doi.org/10.1038/nature07464>.
14. Smagin A.V., Kinetic assessment of gas exchange between the soil and the atmosphere by the static chamber method, *Eur. Soil Sci.*, 2015, Vol. 48, No. 7, pp. 719–725, DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229315070108>.
15. Smagin A.V., Sadovnikova N.B., Sukhorukov S.V., Belyaeva E.A., High-frequency CO<sub>2</sub> monitoring of the soil and vegetation gas exchange with the atmosphere to assess the local carbon balance of a green infrastructure element, *Eur. Soil Sci.*, 2025, Vol. 58, No. 62, pp. 1–15, DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229324603639>.

### ПРИЛОЖЕНИЕ (APPENDIX)



**Рис. 1А.** Сравнение результатов полевой оценки почвенного дыхания по новой технологии с “эталонной” системой LiCOR. Вертикальные и горизонтальные планки – доверительные интервалы для системы LiCOR и новых камер с датчиками HT-401/5 при  $p$ -value = 0.05 после усреднения по двум датчикам и повторностям.

**Fig. 1A.** Comparison of the results of field assessment of soil respiration using the new technology with the “reference” LiCOR system. Vertical and horizontal bars are confidence intervals for the LiCOR system and new chambers with HT-401/5 sensors at  $p$ -value = 0.05 after averaging over two sensors and replicates.

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2026-127-212-242



### Ссылки для цитирования:

Артемьева З.С., Зазовская Э.П., Засухина Е.С., Ярославцева Н.В., Цомаева Е.В., Когут Б.М. Распределение изотопного состава углерода между компонентами органического вещества в целинном и пахотном типичном черноземе // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2026. Вып. 127. С. 212-242. DOI: 10.19047/0136-1694-2026-127-212-242

### Cite this article as:

Artem'eva Z.S., Zazovskaya E.P., Zasukhina E.S., Yaroslavtseva N.V., Tsomaeva E.V., Kogut B.M., Distribution of the isotopic composition of carbon between components of organic matter in virgin and cultivated typical chernozems (Haplic Chernozem), Dokuchaev Soil Bulletin, 2026, V. 127, pp. 212-242, DOI: 10.19047/0136-1694-2026-127-212-242

### Благодарность:

Исследования проведены в рамках Государственного Задания FGUR–2022–0012 с привлечением оборудования Центра коллективного пользования “Функции и свойства почв и почвенного покрова” Почвенного института им. В.В. Докучаева.

### Acknowledgments:

The research was conducted within the framework of State Assignment FGUR–2022–0012 using equipment from the Shared Use Center “Functions and Properties of Soils and Soil Cover” of the V.V. Dokuchaev Soil Science Institute.

## Распределение изотопного состава углерода между компонентами органического вещества в целинном и пахотном типичном черноземе

© 2026 г. З. С. Артемьева<sup>1\*</sup>, Э. П. Зазовская<sup>2\*\*</sup>,  
Е. С. Засухина<sup>3\*\*\*</sup>, Н. В. Ярославцева<sup>1\*\*\*\*</sup>,  
Е. В. Цомаева<sup>1\*\*\*\*\*</sup>, Б. М. Когут<sup>1\*\*\*\*\*</sup>

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

\*<https://orcid.org/0000-0001-9781-9351>, e-mail: [artemyevazs@mail.ru](mailto:artemyevazs@mail.ru),  
\*\*\*<https://orcid.org/0000-0002-5805-4285>,

\*\*\*\*\* <https://orcid.org/0000-0001-8934-8705>,  
\*\*\*\*\* <https://orcid.org/0000-0002-0565-2812>.

<sup>2</sup>Институт географии РАН, Россия,  
119017 Москва, Старомонетный пер., 29,  
\*\* <https://orcid.org/0000-0002-1202-657X>.

<sup>3</sup>Федеральный исследовательский центр  
“Информатика и управление” РАН, Россия,  
119333 Москва, ул. Вавилова, 44, корп. 2,  
\*\*\* <https://orcid.org/0000-0001-5101-8751>.

*Поступила в редакцию 27.03.2024, после доработки 08.12.2025,  
принята к публикации 27.01.2026*

**Резюме:** С помощью метода гранулоденсиметрического фракционирования из поверхностных горизонтов типичного чернозема Курской области резко различных вариантов (степь и бессменный чистый пар) были выделены компоненты органического вещества (ОВ) разной локализации в почвенной матрице. Данные изотопного анализа показали, что локализацию ОВ в почве можно рассматривать в качестве критического условия его биodeградации. Компоненты ОВ разной локализации в почвенной матрице (свободное (ЛФ<sub>СВ</sub>), агрегированное ОВ (ЛФ<sub>АГР</sub>); ОВ илистых фракций (Ил), ОВ фракции Остаток (Ост)) подвергаются микробной обработке в разной степени, что приводит к фракционированию <sup>13</sup>C и находит отражение в различиях их изотопной сигнатуры ( $\delta^{13}\text{C}$ ): величина  $\delta^{13}\text{C}$  минерально-ассоциированного ОВ (Ил + Ост) выше по сравнению с таковой дискретного ОВ (ЛФ<sub>СВ</sub> + ЛФ<sub>АГР</sub>). В условиях длительного режима чистого пара (52 года), в силу практически полного отсутствия поступления свежего растительного материала в течение длительного времени, изотопная сигнатура всех исследованных пулов ОВ, исключая ЛФ<sub>СВ</sub>, сместилась в сторону “утяжеления” за счет субстратного эффекта, сопровождающегося усилением изотопной дискриминации по мере увеличения количества циклов микробной утилизации. Представленная концептуальная схема перегруппировки углерода (C) в системе компонентов ОВ в естественных условиях (степь) демонстрирует, что органический C растительного происхождения (вероятность – высокая) идет от ЛФ<sub>СВ</sub> к фракции Ост через микроагрегаты внутри агрегатов (МА), состоящих из агрегированного ОВ и ОВ илистых частиц. Выявлено, что, несмотря на то что в чистом пару основные пути образования ОВ остались прежними, их вероятность резко снизилась по сравнению с таковыми в варианте степь, по-видимому, в результате замедления микробной активности, вызванного резкими негативными изменениями качества ОВ.

**Ключевые слова:** органическое вещество почвы; цикл углерода; грануло-денсиметрическое фракционирование; изотопный состав С ( $\delta^{13}\text{C}$ ).

## Distribution of the isotopic composition of carbon between components of organic matter in virgin and cultivated typical chernozems (Haplic Chernozem)

© 2026 Z. S. Artemyeva<sup>1\*</sup>, E. P. Zazovskaya<sup>2\*\*</sup>, E. S. Zasukhina<sup>3\*\*\*</sup>,  
N. V. Yaroslavtseva<sup>1\*\*\*\*</sup>, E. V. Tsomaeva<sup>1\*\*\*\*\*</sup>, B. M. Kogut<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/0000-0001-9781-9351>, e-mail: [artemyevazs@mail.ru](mailto:artemyevazs@mail.ru),  
\*\*\*\*<https://orcid.org/0000-0002-5805-4285>,  
\*\*\*\*\*<https://orcid.org/0000-0001-8934-8705>,  
\*\*\*\*\*<https://orcid.org/0000-0002-0565-2812>.

<sup>2</sup>Institute of Geography RAS,  
29 Staromonetnyi per., Moscow 119017, Russian Federation,  
\*\*<https://orcid.org/0000-0002-1202-657X>.

<sup>3</sup>Federal Research Center “Computer Science and Control” RAS,  
bld. 2, 44 Vavilova, Moscow 119333, Russian Federation,  
\*\*\*<https://orcid.org/0000-0001-5101-8751>.

Received 27.03.2024, Revised 08.12.2025, Accepted 27.01.2026

**Abstract:** Using the method of granular-densitometric fractionation, pools of organic matter (OM) of different localization in the soil matrix were isolated from the surface horizons of Haplic Chernozem of the contrasting land use variants (steppe and bare fallow) (Kursk region). Isotope analysis demonstrated that the localization of OM in the soil matrix can be considered as a critical condition for its biodegradation. OM pools of different localization in the soil matrix (free ( $\text{LF}_{\text{fr}}$ ), occluded OM ( $\text{LF}_{\text{occ}}$ ); OM of clay fractions (Clay), OM of the Residue fraction (Res)) are subjected to varying degrees of microbial processing, which leads to fractionation of  $^{13}\text{C}$  fractionation and is reflected in their differences isotopic signature ( $\delta^{13}\text{C}$ ): the  $\delta^{13}\text{C}$  value of mineral-associated OM (Clay + Res) is higher compared to that of discrete OM ( $\text{LF}_{\text{fr}} + \text{LF}_{\text{occ}}$ ). Under conditions of a long bare fallow regime (52 years), due to the almost complete absence of fresh plant material inputs for a long time, the isotopic signature of all studied OM pools, excluding  $\text{LF}_{\text{fr}}$ , shifted towards the  $^{13}\text{C}$  enrichment of OM due to the substrate effect, accompanied by increased isotopic discrimination with an increase in the

number of microbial recycling cycles. The presented conceptual scheme of carbon (C) fluxes in a system of OM pools in native conditions (steppe) demonstrates that the C flow of plant origin (high probability) goes from  $LF_{fr}$  to the Res through microaggregates within aggregates (mA) consisting of occluded OM and Clay-bound OM. It was revealed that, despite the fact that in the bare fallow the main pathways of OM formation remained the same, their probability decreased sharply compared to those in the steppe, apparently as a result of a slowdown in microbial activity caused by sharp negative changes in the OM quality.

**Keywords:** soil organic matter; carbon cycle; granulo-desitometric fractionation; stable C isotopic composition ( $\delta^{13}C$ ).

## ВВЕДЕНИЕ

Органическое вещество (ОВ) почвы является крупнейшим наземным резервуаром органического углерода (C) (Lal, 2008; Lehmann, Kleber, 2015). Более того, органический углерод почвы (SOC) в настоящее время рассматривается в качестве основной составляющей глобального цикла углерода (Golchin et al., 1994; Piccolo et al., 2004; Oik, Gregorich, 2006; Basile-Doelsch et al., 2020). В связи с этим можно предполагать, что даже незначительное уменьшение ОВ почв способно влиять на уровень  $CO_2$  в атмосфере, усиливая парниковый эффект по принципу обратной связи. Органическое вещество почв – континуум гетерогенных по составу, свойствам, структуре, функциям, радиоуглеродному возрасту, временам обновления компонентов, что во многом обусловлено их разным пространственным расположением в почвенной матрице. Это, в свою очередь, обуславливает разные условия его биодegradации, что чрезвычайно важно с точки зрения стабилизации углерода (C) в почве.

Анализ стабильных изотопов углерода ( $\delta^{13}C$ ) все чаще используется для оценки степени разложения ОВ в почвах, а также для выявления долговременных изменений в составе ОВ почвы (Wedin et al. 1995; Connin et al., 2001; Werth, Kuzyakov, 2010; Gunina, Kuzyakov, 2014; Liu et al., 2018; Atere et al., 2020). Кроме того, анализ  $\delta^{13}C$  в сочетании с фракционированием ОВ, в первую очередь, учитывающим пространственное расположение разных пулов ОВ в почве, обеспечивает мощный способ количественной оценки динамики ОВ почвы в ответ на изменения варианта земле-

пользования (Liu et al., 2018). В дополнение это может быть полезно для изучения небольших изменений в запасах углерода в почве, которые будут значительными в долгосрочной перспективе, но не могут быть обнаружены с помощью традиционных методологий (del Galdo et al., 2003).

Этот подход основан на известном биологическом правиле, согласно которому биоразложение органических материалов приводит к накоплению  $^{13}\text{C}$  в результате: 1) субстратного эффекта (предпочтительная стабилизация органических материалов с легкой или тяжелой сигнатурой  $\delta^{13}\text{C}$ ; 2) увеличения количества циклов утилизации микробов (Powers, Schlesinger, 2002; Werth, Kuzyakov, 2010; Гунина, Кузяков, 2014; Liu et al., 2018).

Кроме того, естественное содержание  $^{13}\text{C}$  дает информацию о вероятности прямых потоков С между различными пулами ОБ на основе следующих предположений: 1) обогащение  $^{13}\text{C}$  между пулами ОБ соответствует последовательным стадиям образования ОБ; 2) фракционирование  $^{13}\text{C}$  ( $\Delta^{13}\text{C}$ ) зависит в основном от стадий превращения (минимальные различия между  $\Delta^{13}\text{C}$  фракций ОБ между различными экосистемами соответствуют максимальной вероятности путей образования ОБ) (Powers, Schlesinger, 2002; Werth, Kuzyakov, 2010; Gunina, Kuzyakov, 2014; Liu et al., 2018; Артемьева и др., 2023).

Разложение/переработка ОБ чувствительна ко многим факторам, включая климат (Cheng et al., 2011), методы управления почвой (Alvaro-Fuentes et al., 2008; He et al., 2015), а также вариантам землепользования (Soenne et al., 2016). Долгосрочные полевые эксперименты дают наиболее точную информацию о влиянии различных вариантов землепользования на стабилизацию углерода. Почва, длительное время функционирующая в режиме чистого пара, представляет собой крайнюю стадию деградации (Jensen et al., 2020). Соответственно, анализ влияния истощения ОБ может дать новый взгляд на механизмы, лежащие в основе стабилизации углерода (Schweizer et al., 2024). Поэтому в представленном здесь исследовании мы изучили фракционирование стабильных изотопов С, которое происходит при разложении ОБ в условиях контрастных вариантов землепользования: степь и длительный (52 года) чистый пар.

Целями данного исследования были: 1) оценить влияние длительного режима чистого пара на состав стабильных изотопов С пулов ОБ типичного чернозема; 2) разработать расширенную схему потоков углерода в системе пулов ОБ; и 3) оценить их динамику в контрастных вариантах землепользования.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объект исследования – типичный чернозем (Narlic Chernozems; WRB, 2022) в условиях контрастных вариантов использования: степь (Центрально-Черноземный государственный биосферный заповедник “Стрелецкая степь” Курская область) и длительный (52 г.) чистый бессменный пар без удобрений (Курский Федеральный Аграрный Исследовательский Центр). Подробная информация о климатических условиях исследованной территории, породах, а также некоторых химических свойствах представлена ранее (Artemyeva et al., 2021).

Ненарушенные монолитные образцы почвы (размером  $25 \times 25 \times 15$  см) (3-кратная повторность) были отобраны с одинаковой глубины (5–25 см) ( $n = 6$ ). После высушивания образцов в лабораторных условиях они были просеяны через сито ( $d = 1$  мм), остаток на сите был осторожно растерт пестиком с резиновым наконечником и также пропущен через сито. Все просеянные части из каждого образца были объединены. Далее образцы были подвергнуты грануло-денситметрическому фракционированию.

Был использован модифицированный метод гранулоденситметрического фракционирования почв; полная схема представлена ранее (Artemyeva et al., 2021b). Свободное ОБ (неагрегированное ОБ (ЛФ<sub>СВ</sub>), локализуемое в межагрегатном пространстве агрегатов) – легкие фракции (плотность  $< 1.8$  г/см<sup>3</sup>) выделялись с помощью бромформ-этанольной смеси (БЭС). После удаления ЛФ<sub>СВ</sub> с помощью ультразвукового диспергатора зондового типа ЛУЗД-0,5К-02-00000 ПС (Криамид, Россия) разрушали агрегаты. После озвучивания (71 Дж/мл) образца почвы (10 г + 50 мл деионизированной воды) в течение 1 минуты с последующим центрифугированием получали илистые частицы, процедуру повторяли 15 раз. После удаления илистых частиц (Ил) из образца с помощью тяжелой жидкости БЭС выделялось агрегированное

ОВ (локализованное внутри микроагрегатов (ЛФ<sub>АГР</sub>)) – легкие фракции (плотность < 1.8 г/см<sup>3</sup>). Все фракции, исключая Ил, отмывались от остатков БЭС и высушивались (60 °С, время сушки определялось визуально). Все выделения проводили в 3-кратной повторности (n = 6).

Примененная схема фракционирования позволяет выделить 4 пула ОВ: неагрегированное (свободное) ОВ (ЛФ<sub>св</sub>), агрегированное ОВ (ЛФ<sub>АГР</sub>), ОВ ила (Ил) и Остатка (Ост).

ЛФ<sub>АГР</sub> и Ил – компоненты микроагрегатов внутри агрегатов (МА) (Golchin et al., 1994b; Puget et al., 1995), связь между компонентами слабая, поэтому они легко высвобождаются под влиянием кавитации. Микроагрегаты, устойчивые в ультразвуковом поле, состоят из илистых частиц и адсорбированных на них микробных метаболитов и микробной биомассы (Tisdall, Oades, 1982; Oades, Waters, 1991; Golchin et al., 1997; Chenu, Plante, 2006; Asano, Wagai, 2014), локализуются во фракции Остаток.

Содержание углерода и азота в грануло-денсиметрических фракциях определяли методом каталитического сжигания на анализаторе TOC Analyzer (Shimadzu, Japan).

Измерение изотопного отношения более тяжелого изотопа к легкому – <sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C проводили на комплексе оборудования, состоящем из элементного CHNS анализатора vario ISOTOPE select (Elementar, Германия) и precision IRMS (Elementar, Великобритания) в ЦКП “Лаборатория радиоуглеродного датирования и электронной микроскопии” Института географии РАН.

Изотопный состав углерода органического вещества выражали в тысячных долях отклонения от международного эталона (vPDB):

$$\delta(\text{‰}): \delta X_{\text{образец}} = [(R_{\text{образец}} - R_{\text{стандарт}}) / R_{\text{стандарт}}] \times 1000,$$

где X – это элемент (C), а R – молярное соотношение изотопов в анализируемом образце и эталоне. В эталонах по определению  $\delta^{13}\text{C}$  равно нулю.

Образцы были проанализированы относительно референтного газа (CO<sub>2</sub>), откалиброванного по стандартам МАГАТЭ.

Для оценки статистической значимости различий в массе, С, N, соотношении C/N в разных пулах ОВ, а также содержании  $^{13}\text{C}$  и дискриминации  $^{13}\text{C}$  ( $\Delta^{13}\text{C}$ ) использован непарный t-критерий (Microsoft Excel 2010, Microsoft Corporation, Redmond, WA, USA). Выбранный уровень значимости  $p < 0.05$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

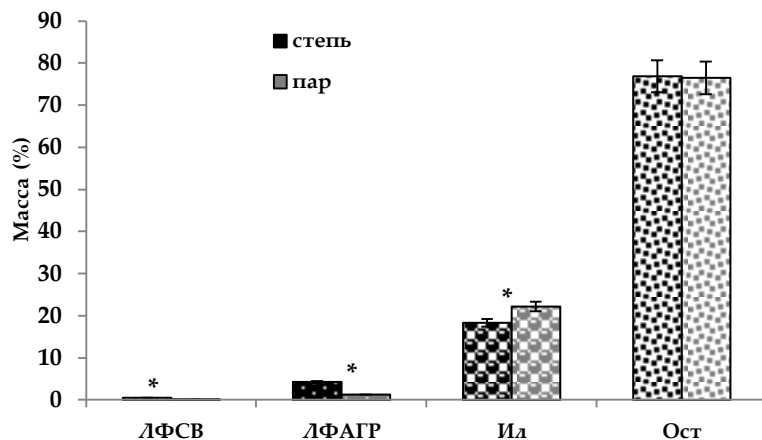
### *Масса, С, N, а также C/N пулов ОВ разной локализации в почвенной матрице*

Функционирование типичного чернозема в режиме чистого пара в течение 52 лет вызвало резкие изменения в распределении пулов ОВ: количество свободного (ЛФ<sub>СВ</sub>) и агрегированного (ЛФ<sub>АГР</sub>) ОВ уменьшилось с 0.52 до 0.04% (в 13 раз) и с 4.28 до 1.27% (в 3.4 раза) соответственно; количество илистой фракции увеличилось с 18.32 до 22.18% (> 1.2 раза), а фракции Остаток практически не изменилась. Все различия между вариантами земледпользования были статистически значимыми, за единственным исключением (Остаток) (рис. 1).

Величины концентрации С и N в исследованных фракциях всегда были выше в варианте степь по сравнению с вариантом пар. Все различия между вариантами земледпользования были статистически значимыми, за единственным исключением (концентрация С в ЛФ<sub>СВ</sub>) (рис. 2а, б). Отношение C/N во всех фракциях варианта пар всегда было выше по сравнению с таковыми варианта степь (рис. 2с), что связано с более выраженными потерями N по сравнению с С (рис. 2б). Все различия между вариантами земледпользования были статистически значимыми, за единственным исключением (Ил).

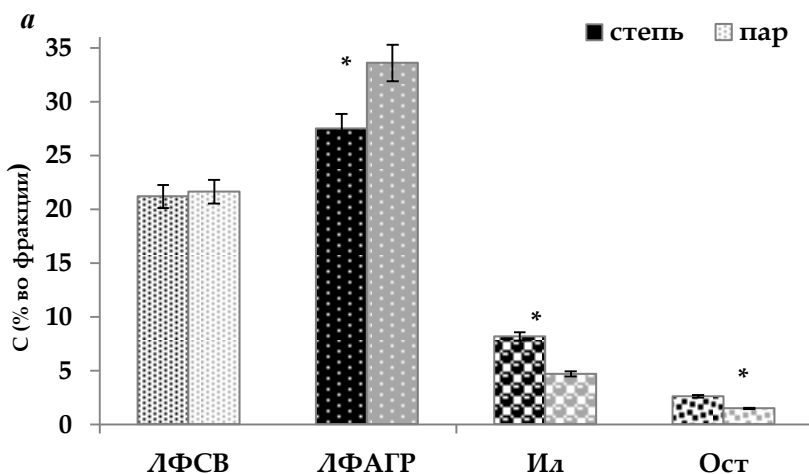
### *Содержание $^{13}\text{C}$ в различных пулах ОВ*

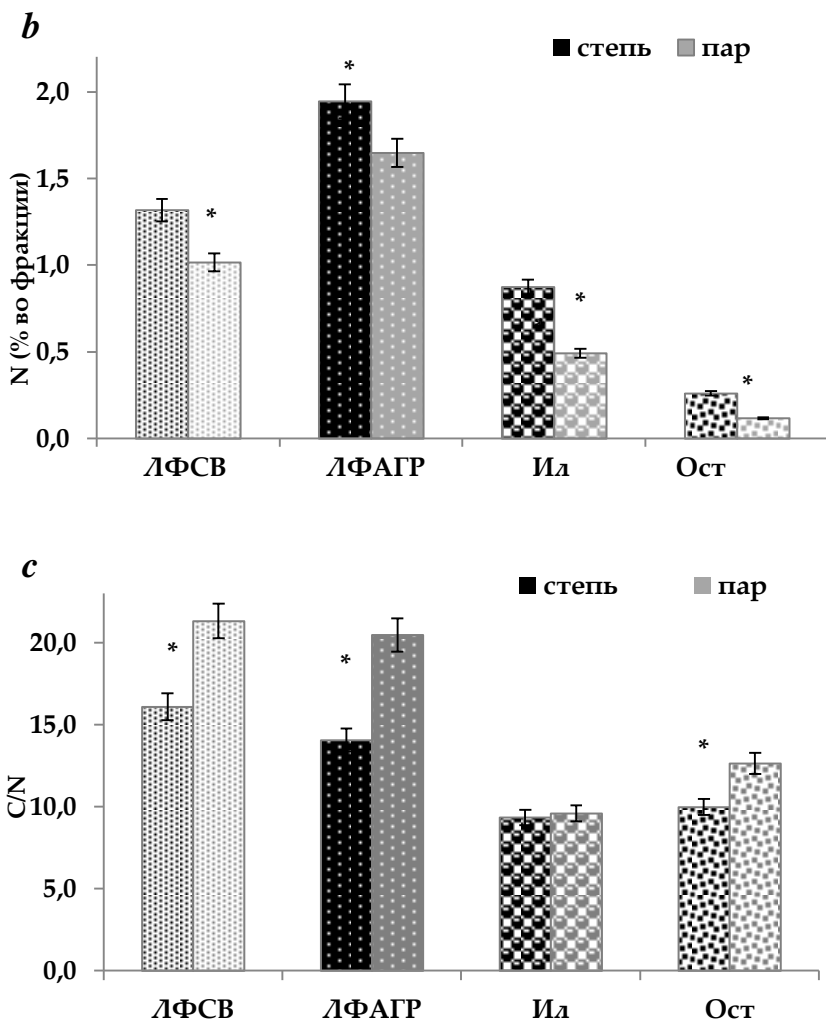
Средние значения  $\delta^{13}\text{C}$  нефракционированных почв ( $-25.94 \pm 0.02\text{‰}$  (степь) и  $-25.72 \pm 0.01\text{‰}$  (пар) укладываются в диапазон, характерный для почв умеренного климата: от  $-24$  до  $-29\text{‰}$  (Balesdant et al., 1987).



**Рис. 1.** Распределение разных пулов ОВ типичного чернозема (Курская область) контрастных вариантов землепользования ( $p < 0.05$ ). Здесь и далее: статистически значимые различия обозначены звездочкой.

**Fig. 1.** The distribution of different OM pools in Haplic Chernozem (Kursk region) in the contrasting variants of land use ( $p < 0.05$ ). Hereafter: statistically significant differences are marked with the symbol \*.

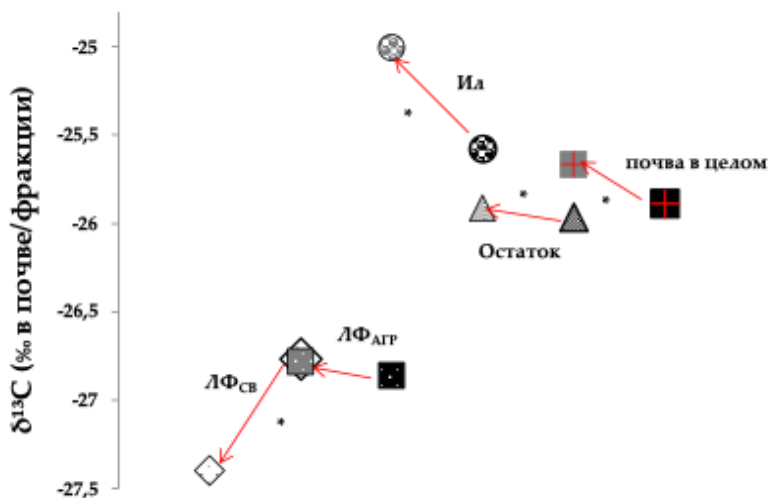




**Рис. 2.** Распределение C (a), N (b), а также величина отношения C/N (c) разных пулах ОВ типичного чернозема (Курская область) контрастных вариантов землепользования ( $p < 0.05$ ).

**Fig. 2.** The distribution of C (a), N (b), and the C/N ratio (c) in different OM pools in Haplic Chernozem (Kursk region) in the contrasting variants of land use ( $p < 0.05$ ).

Анализ изотопной сигнатуры разных пулов ОВ типичного чернозема показал незначительные различия между значениями  $\delta^{13}\text{C}$  (рис. 3).



**Рис. 3.** Величина  $\delta^{13}\text{C}$  в разных пулах ОВ и в почве в целом типичного чернозема (Курская область) в контрастных вариантах землепользования: черный цвет – степь, серый цвет – пар.

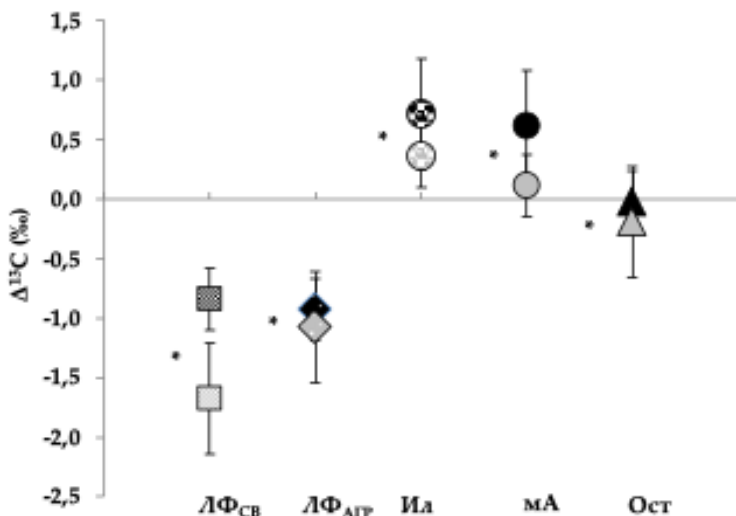
**Fig. 3.** The  $\delta^{13}\text{C}$  values of different OM pools, as well as of unfractionated soil in Haplic Chernozem (Kursk region) in the contrasting variants of land use ( $p < 0.05$ ). Hereafter: black symbols are the three replicates from the steppe, and gray symbols are the three replicates from the bare fallow.

Столь небольшие различия между значениями  $\delta^{13}\text{C}$  пулов ОВ являются обычными и отмечаются многими авторами (Balesdent et al. 1987; Bonde et al. 1992; Golchin et al., 1995a; Preston et al., 2009). Различия в степени обогащенности  $^{13}\text{C}$ , как правило, связана с различиями состава разных пулов ОВ (Golchin et al., 1995a).

Значения  $\delta^{13}\text{C}$  для дискретного ОВ (ЛФ<sub>СВ</sub> и ЛФ<sub>АГР</sub>) укладываются в диапазон, характерный для биомассы наземных СЗ-растений (22–32‰), и близки к их средним значениям  $\delta^{13}\text{C}$

(-27%). Изотопный состав углерода минерально-ассоциированного ОВ (Ил и Остаток) значительно отличается от такового дискретного ОВ. Оно обогащено  $^{13}\text{C}$  по сравнению с почвой в целом и дискретным ОВ (рис. 3). Согласно литературным данным, увеличение величины  $\delta^{13}\text{C}$  соответствует увеличению степени его микробной переработки, наряду с увеличением степени его ассоциации с минеральной матрицей почвы (Werth, Kuzyakov, 2010).

Для оценки величины “изотопного фракционирования” ( $^{13}\text{C}$  дискриминации) рассчитывали разницу между значениями  $\delta^{13}\text{C}$  каждого пула ОВ и  $\delta^{13}\text{C}$  нефракционированной почвы ( $\Delta^{13}\text{C} = \delta^{13}\text{C}_{\text{пул}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{почва}}$ ) (рис. 4). По мнению Гуниной, Кузякова (2014), различия в величине  $\Delta^{13}\text{C}$  отражают разную степень разложения ОВ в каждом пуле ОВ по сравнению с ОВ почвы.



**Рис. 4.** Степень изотопной дискриминации ( $\Delta^{13}\text{C}$ ) в разных пулах ОВ типичного чернозема (Курская область) в контрастных вариантах землепользования: черный цвет – степь, серый цвет – пар.

**Fig. 4.**  $^{13}\text{C}$  discrimination values of different OM pools, as well as of mA (microaggregates within aggregates, unstable under the sonication) in Haplic Chernozem (Kursk region) in the contrasting variants of land use ( $p < 0.05$ ).

Как показано на рисунке 4, обогащение  $^{13}\text{C}$  увеличивается по мере увеличения степени ассоциации с минеральной матрицей почвы: от дискретного ОВ (ЛФ<sub>СВ</sub> и ЛФ<sub>АГР</sub>) к минерально-ассоциированному (Ил и Остаток) (рис. 4). Таким образом, процессы разложения ОВ приводят к фракционированию  $^{13}\text{C}$ , соответственно, разные фракции ОВ характеризуются разными значениями  $\delta^{13}\text{C}$ .

### ***Содержание $^{13}\text{C}$ в пулах ОВ разной локализации в почвенной матрице***

Дискретное ОВ (ЛФ<sub>СВ</sub> и ЛФ<sub>АГР</sub>) обеднено  $^{13}\text{C}$  по сравнению с почвой в целом и минерально-ассоциированным ОВ (Ил и Остаток), а также нефракционированной почвой. Как правило, по мере увеличения плотности и степени ассоциации ОВ с минеральной матрицей почвы повышается степень его микробиологической переработки, что находит отражение в увеличении значения  $\delta^{13}\text{C}$  (Golchin et al., 1995a; Baisden et al., 2002; del Galdo et al., 2003; Crow et al., 2007; Llorente et al., 2010; Atere et al., 2020). Различия в изотопной сигнатуре ЛФ<sub>СВ</sub> и ЛФ<sub>АГР</sub>, по-видимому, обусловлены, в первую очередь, их разной пространственной локализацией в почвенной матрице: в межпоровом пространстве для (ЛФ<sub>СВ</sub>) и в микроагрегатах (неустойчивых в УЗ-поле – МА) внутри агрегатов (ЛФ<sub>АГР</sub>) (Six et al., 1998). Соответственно, ЛФ<sub>СВ</sub> практически лишено защитных механизмов (в первую очередь, физической защиты) и поэтому в большей степени доступно для микробиоты, по сравнению с ЛФ<sub>АГР</sub>, которое физически защищено от микробных атак внутри МА. Однако, согласно нашим аналитическим данным, изотопная сигнатура  $\delta^{13}\text{C}$  ЛФ<sub>СВ</sub> оказалась более тяжелой по сравнению с таковой ЛФ<sub>АГР</sub> (рис. 3), что не согласуется с предполагаемой большей микробной переработкой ЛФ<sub>АГР</sub> по сравнению с таковой ЛФ<sub>СВ</sub> (Six et al., 1998; Baisden et al., 2002). Тем не менее это согласуется с некоторыми литературными данными о более тяжелой изотопной сигнатуре  $\delta^{13}\text{C}$  ЛФ<sub>СВ</sub> по сравнению с таковой ЛФ<sub>АГР</sub> (Six et al., 1998; Baisden et al., 2002; John et al., 2005; Rasmussen et al., 2005). В частности, “утяжеление” изотопной сигнатуры ЛФ<sub>СВ</sub> может быть обусловлено, в том числе селективным сохранением углей или устойчивых биомолекул, а также утилиза-

цией растительных или микробных липидов, которые обычно характеризуются более “легким” изотопным составом С (Park, Epstein, 1961; John et al., 2005; Rasmussen et al., 2005; Badeck et al., 2005). Это согласуется с обогащением ЛФ<sub>СВ</sub> липидами по сравнению с ЛФ<sub>АГР</sub> (в 2.5 раза) (Artemyeva et al., 2021b).

Минерально-ассоциированное ОВ (Ил и Остаток) было обогащено <sup>13</sup>С по сравнению с почвой в целом и дискретным ОВ. Это согласуется с многочисленными литературными данными об “утяжелении” изотопного состава С по мере увеличении степени ассоциации с минеральной фазой почвы (Golchin et al., 1995a; Balesdant et al., 1987; Ehleringer et al., 2000; Six et al., 2001; Baisden et al., 2002; del Galdo et al., 2003; Fernández et al., 2003; Crow et al., 2006; Llorente et al., 2010; Atere et al., 2020). Учитывая, что ОВ этих фракций имеет преимущественно микробное происхождение, более высокое содержание <sup>13</sup>С в данных фракциях по сравнению с дискретным ОВ свидетельствует об увеличении степени дискриминации <sup>13</sup>С по мере прохождения микробных циклов утилизации (Golchin et al., 1994b; Balesdent, Mariotti, 1996; Bol et al., 1999; Ehleringer et al., 2000; Gunina, Kuzyakov, 2014).

Анализ изотопной сигнатуры ОВ почвы в целом (вариант пар) показал незначительные отличия по сравнению с вариантом степь: 25.72±0.01 vs. -25.94±0.02‰ соответственно, что согласуется с литературными данными (Campardella, Elliott, 1992). Кроме того, аналитические данные по δ<sup>13</sup>С для почвы в целом в варианте пар оказались близки к таковым для типичного чернозема (Курская область), полученным ранее другими авторами (-25.60‰) (Menichetti et al., 2014).

Величины δ<sup>13</sup>С для разных пулов ОВ в варианте пар демонстрируют незначительное, но последовательное увеличение относительно таковых варианта степь (рис. 3). При этом различия более выражены для дискретного ОВ (ЛФ<sub>АГР</sub>), что еще раз подчеркивает его большую чувствительность к изменению экологических условий (например, варианту землепользования) по сравнению с фракциями с большей степенью ассоциации с минеральной фазой (Ил и Остаток) (рис. 3). Единственное исключение наблюдалось для ЛФ<sub>СВ</sub>, чья изотопная сигнатура оказалась “легче” в варианте

пар по сравнению с таковой варианта степь. Все различия между вариантами землепользования были статистически значимыми.

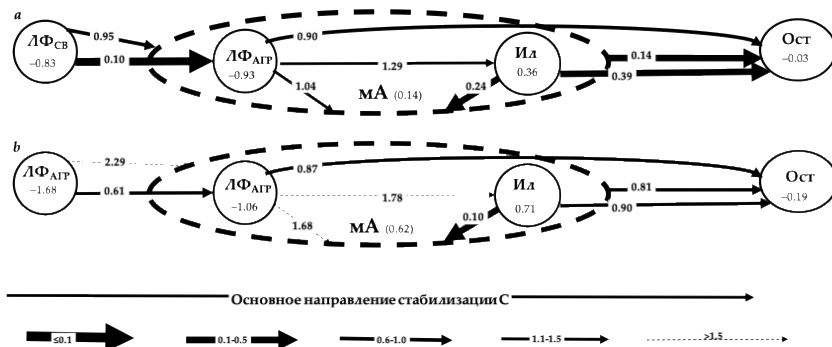
По-видимому, в силу отсутствия постоянного поступления свежего растительного материала в течение длительного времени изотопная сигнатура будет все больше смещаться в сторону “утяжеления” за счет субстратного эффекта, т. е. истощения биохимических компонентов с легким составом, сопровождающимся усилением изотопной дискриминации при увеличении количества циклов микробной утилизации (Šantrůčková et al., 2000; Hobbie, Colpaert, 2004; Boström, 2008). Это согласуется с выводами Menichetti et al. (2014), которые исследовали изменения изотопной сигнатуры ( $\delta^{13}\text{C}$ ) в пяти европейских многолетних экспериментах с чистым паром, включая и объект наших исследований. Эти авторы настаивают, что последовательное увеличение  $\delta^{13}\text{C}$  обусловлено потерями  $\text{C}$ , обедненного  $^{13}\text{C}$ , а возможные причины – это микробный метаболизм и субстратные эффекты (Menichetti et al., 2014).

### *Потоки углерода в системе пулов ОВ*

Пути потоков  $\text{C}$  между пулами ОВ определяли согласно подходу, предложенному Гуниной и Кузяковым (2014), основанному на гипотезе о том, что фракции ОВ со схожими значениями  $\delta^{13}\text{C}$  более тесно связаны/ассоциированы, чем характеризующиеся различающимися значениями  $\delta^{13}\text{C}$ ; а также на основе биологического правила, согласно которому степень обогащения  $^{13}\text{C}$  увеличивается по мере увеличения циклов микробной утилизации.

Следуя этому подходу (Gunina, Kuzyakov, 2014), для анализа возможных путей образования ОВ мы расположили пулы ОВ в схему, состоящую из пулов ОВ, расположенных по возрастанию их плотности, а также в соответствии с примененной схемой фракционирования:  $\text{ЛФ}_{\text{СВ}} \rightarrow \text{ЛФ}_{\text{АГР}} \rightarrow \text{Ил} \rightarrow \text{Остаток}$  (рис. 5). Такой порядок подразумевает, что увеличение плотности приводит к усилению трансформации растительного  $\text{C}$  (Sollins et al., 2009; Dorodnikov et al., 2011) и следует логической последовательности разложения ОВ в почве: только частично биологически переработанное и фрагментированное  $\text{ЛФ}_{\text{СВ}}$  может быть инкапсулировано глинистыми частицами ( $\text{ЛФ}_{\text{СВ}} \rightarrow \text{ЛФ}_{\text{АГР}}$ ) в составе МА; продукты

разложения ЛФ<sub>АГР</sub> адсорбируются на минеральной матрице (Ил) (т. е. ЛФ<sub>АГР</sub> → минерально-ассоциированное ОВ (Ил)); части/фрагменты разрушенных МА, практически утерявшие свое органическое ядро (ЛФ<sub>АГР</sub>), локализуются во фракции Остаток с наиболее стабильным (инертным) ОВ (гумин) (Artemyeva et al., 2021b; Данченко и др., 2022).



**Рис. 5.** Концептуальная схема потоков углерода в системе разных пулов ОВ типичного чернозема (Курская область) в контрастных вариантах землепользования: **а** – степь; **б** – пар. Стрелками показаны направления потоков углерода; их ширина отражает относительную вероятность потока углерода между пулами/почвой, числа вдоль стрелок показывают относительную вероятность потока углерода. Меньшие различия в величинах  $\Delta^{13}\text{C}$  соответствуют более высокой степени вероятности потока С:  $\leq 0.1$  – максимально высокая; 0.1–0.5 – очень высокая; 0.5–1.0 – высокая; 1.0–1.5 – средняя;  $> 1.5$  – маловероятная.

**Fig. 5.** Conceptual diagram of C flows in the system of different soil OM pools in Haplic Chernozem (Kursk region) in the contrasting variants of land use: **a** – steppe; **b** – bare fallow. The arrows show the directions of C flows; their widths reflect the relative probability of C flow between OM pools; the numbers along the arrows indicate the relative probability of C flow. The smaller difference in  $\Delta^{13}\text{C}$  values corresponds to a higher probability of C flow:  $\leq 0.1$  – maximum high; 0.1–0.5 – very high; 0.5–1.0 – high; 1.0–1.5 – medium;  $>1.5$  – unlikely.

Таким образом, мы не следуем общепринятой схеме, основанной лишь на формальном рассмотрении фракции с наименьшей величиной  $\delta^{13}\text{C}$  в качестве источника С, а с наибольшей – ее продукта. Тем не менее схема (рис. 5) позволяет сделать вывод, что основное направление потоков С в почве – от ЛФ<sub>СВ</sub> к минерально-ассоциированному ОВ (Ил и Остаток): слева направо (рис. 5), что согласуется со схемами, представленными ранее (Werth, Kuzyakov, 2010; Gunina, Kuzyakov, 2014; Liu et al., 2018; Atere et al., 2020).

Далее, для количественной оценки вероятности прямого потока С ( $\Delta_{\Delta}$ ),  $\Delta^{13}\text{C}$  “продукта” вычитали из  $\Delta^{13}\text{C}$  “источника” для каждого пула ОВ, подразумевая, что чем меньше эта разница, тем больше вероятность потока С между этими двумя фракциями (т. е. более обогащенная  $^{13}\text{C}$  является “продуктом” менее обогащенной за счет разложения ОВ и/или других процессов) (Werth, Kuzyakov, 2010; Gunina, Kuzyakov, 2014).

Прежде всего рассмотрим возможные пути образования ОВ в варианте степь (рис. 5а). Мы считаем, что свободное ОВ (ЛФ<sub>СВ</sub>) является отправной точкой потока углерода растительного происхождения в другие пулы ОВ. Несмотря на более тяжелую сигнатуру  $\delta^{13}\text{C}$  ЛФ<sub>СВ</sub> по сравнению с ЛФ<sub>АГР</sub> (см. выше), это никоим образом не исключает очень высокой вероятности прямого потока С из ЛФ<sub>СВ</sub> в ЛФ<sub>АГР</sub>, о чем свидетельствует очень низкая величина  $\Delta_{\Delta} = 0.10$  (рис. 5а). А более тяжелая изотопная сигнатура ЛФ<sub>СВ</sub>, по сравнению с ЛФ<sub>АГР</sub>, лишь отражает более высокую степень физической защищенности от микробных атак последнего (внутри МА) по сравнению с первым (в межагрегатном пространстве).

Несколько удивительно, что прямой поток С из ЛФ<sub>СВ</sub> в МА оценивается как высоковероятный, однако он менее вероятен (>9 раз) по сравнению с потоком в ЛФ<sub>АГР</sub> (очень высокая вероятность). По-видимому, это отражает пространственную локализацию ЛФ<sub>СВ</sub> (в межпоровом пространстве), что предполагает значительную степень фрагментации и ферментации растительных остатков в качестве необходимого условия их инкрустации глинистыми частицами. Таким образом, примененный подход (Gunina, Kuzyakov, 2014) может быть информативным и для оценки про-

странственной доступности ОВ для микроорганизмов и ферментов, в том числе его физической защиты.

Очевидно, что при формальном подходе вероятность прямого потока С из ЛФ<sub>АГР</sub> в илистую фракцию оценивается как средневероятная:  $\Delta_{\Delta} = 1.29$  (рис. 5а). Однако, по нашему мнению, это лишь указывает на высокую степень микробиологической переработки органического материала в качестве критического условия адсорбции ОВ на глинистой матрице почвы (т. е. ЛФ<sub>АГР</sub> → минерально-ассоциированное ОВ (Ил)). Зато вероятность прямого потока из ЛФ<sub>АГР</sub> в МА, хотя и оценивается на уровне близком к средней ( $\Delta_{\Delta} = 1.04$ ), тем не менее она выше таковой в илистую фракцию (рис. 5). Это сопровождается очень высокой степенью вероятности прямого потока С из илистой фракции в МА ( $\Delta_{\Delta} = 0.24$ ). Таким образом, примененный подход хорошо согласуется с принципиальной схемой образования микроагрегатов внутри агрегатов (неустойчивых в УЗ-поле), состоящих из органического ядра – агрегированного ОВ (ЛФ<sub>АГР</sub>) и минеральной компоненты (Ил), которая его (ядро) инкрустирует. Инкрустация дискретного ОВ минеральными частицами почвы возрастает благодаря постоянному микробиологическому разложению дискретного ОВ и образованию различных клеящих агентов белковой и липидной природы. Частичная деградация и фрагментация является обязательным условием для инкрустации твердых растительных остатков глинистыми частицами (т. е. ЛФ<sub>СВ</sub> → ЛФ<sub>АГР</sub>) (Golchin et al., 1994; 1998; Jastrow, 1996; Wagai et al., 2009; Artemyeva et al., 2021b).

Из илистой фракции поток С следует во фракцию Остаток (вероятность очень высокая –  $\Delta_{\Delta} = 0.39$ ), однако вероятность прямого потока С во фракцию Остаток из неустойчивых в УЗ-поле микроагрегатов (МА) оказалась выше ( $\Delta_{\Delta} = 0.14$ ) (рис. 5а). Это может быть косвенным доказательством пополнения ОВ фракции Остаток преимущественно за счет частей/осколков разрушенных МА (“корок” разрушенных МА, пропитанных микробными продуктами) (Six et al., 2004; Артемьева и др., 2023).

Аналогичная схема потоков С в варианте пар демонстрирует значительные количественные изменения в величине их вероятности (рис. 5б). Тем не менее принципиальные пути преобразования ОВ остались прежними.

Свободное ОВ (ЛФ<sub>СВ</sub>) по-прежнему является отправной точкой потока С растительного происхождения в остальные пулы ОВ (рис. 56). Однако вероятность потока из ЛФ<sub>СВ</sub> в ЛФ<sub>АГР</sub> в варианте пар резко снижается (в 6 раз). Это, по-видимому, обусловлено значительно большей разницей в степени изотопной дискриминации <sup>13</sup>С в ЛФ<sub>СВ</sub> варианта пар по сравнению с таковой в варианте степь (в 2 раза) на фоне значительно менее выраженных различий для ЛФ<sub>АГР</sub> (в 1.1 раза) (рис. 4). Учитывая незначительные различия в химической структуре ЛФ<sub>СВ</sub> в контрастных вариантах землепользования (Artemyeva et al., 2021b), можно предполагать, что это связано с резким снижением микробной активности в варианте пар, что приводит к замедлению разложения ОВ, что косвенно подтверждается уменьшением вклада полипептидов (>1.3 раза) в ЛФ<sub>СВ</sub> в варианте пар. Это согласуется с литературными данными о резком снижении микробной активности в чистом пару в различных почвах прежде всего за счет резкого обеднения азотом (Kot et al., 2015; Завьялова и др., 2020). В частности, потери N в ЛФ<sub>СВ</sub> в исследованном варианте чистого пара составили около 95%.

Интересно, что прямой поток С из ЛФ<sub>СВ</sub> в МА в варианте пар практически исключен (вероятность маловероятна) – величина Δ<sub>Δ</sub> слишком велика (2.29).

Вероятность прямого потока С из ЛФ<sub>АГР</sub> в илстую фракцию в варианте пар оказался еще ниже по сравнению с таковой в варианте степь: 1.78 против 1.29 соответственно. Это также обусловлено большей разницей в степени изотопной дискриминации <sup>13</sup>С в Иле в варианте пар (в 2 раза) на фоне значительно менее выраженных различий для ЛФ<sub>АГР</sub> (в 1.1 раза). В частности, это может быть связано с резкими негативными изменениями качества ЛФ<sub>АГР</sub> в варианте пар, приводящими к замедлению микробной активности. Как было показано ранее (Artemyeva et al., 2021b), 52-летнее функционирование типичного чернозема в режиме чистого пара вызвало в ЛФ<sub>АГР</sub> резкое увеличение степени разложенности (DI) (>1.4 раза), ароматичности (ARI) (в 1.6 раза) и гидрофобности (HI) (>1.8 раза). Таким образом, ЛФ<sub>АГР</sub> в варианте пар потерял свои наиболее легкодоступные и энергетически привлекательные для микробного сообщества фрагменты органического материала в

ходе предыдущих циклов микробной утилизации: вклад фрагментов O-Alk снизился более чем в 1.7 раза по сравнению с таковым в варианте степь. Вследствие чего в ЛФ<sub>АГР</sub> резко упала микробная активность – количество полипептидов снизилось более чем в 1.4 раза по сравнению с вариантом степь. Кроме того, потери N в ЛФ<sub>АГР</sub> в варианте пар превысили 75%. Все это указывает на: 1) снижение микробной активности; 2) снижение вероятности адсорбции продуктов микробного разложения ЛФ<sub>АГР</sub> на минеральную матрицу.

Однако вероятность прямого поступления C из илистой фракции в мА в варианте пар по сравнению с таковой в степи была существенно выше (в 4.6 раза): 1.10 против 0.24 соответственно. Последнее косвенно свидетельствует в пользу резкого снижения доли органического ядра мА (ЛФ<sub>АГР</sub>), сопровождающееся увеличением доли минерального компонента в мА. Это находит подтверждение в уменьшении количества ЛФ<sub>АГР</sub> в варианте пар относительно такого в варианте степь (более чем в 3.5 раза) на фоне увеличения количества Ила (в 1.2 раза) (рис. 1).

Вероятность прямого потока C из илистой фракции во фракцию Остаток в варианте пар остается достаточно высокой ( $\Delta_{\Delta} = 0.90$ ), хотя значительно снижается (в 2.3 раза) по сравнению с таковой в варианте степь ( $\Delta_{\Delta} = 0.39$ ). Скорее всего, это также связано с большей разницей в величине дискриминации  $^{13}\text{C}$  во фракции Остаток в варианте пар (в 6.5 раза) на фоне существенно менее выраженных различий в илистой фракции (в 2 раза). По-видимому, это связано с замедлением микробной активности в этих фракциях (вклад полипептидов уменьшился в 1.2 раза (Ил) и более чем в 1.5 раза (Остаток)) за счет негативных изменений качества ОВ (снижение количество привлекательного для микробного сообщества органического материала – вклад фрагментов O-Alk снизился в 1.3 (Ил) и 1.4 раза (Остаток)), а также потерей N (33% (Ил) и 55% (Остаток) (Artemyeva et al., 2021b)). В минерально-ассоциированном ОВ (Ил и Остаток) длительное функционирование в режиме чистого пара вызывало увеличение степени разложенности (DI) (в 1.1 и 1.3 раза соответственно), ароматичности (ARI) (в 1.7 и 1.6 раза соответственно) и гидрофобности (HI) (в 1.3

и 1.5 раза соответственно) по сравнению с таковыми в варианте степь.

Таким образом, если в варианте степь вероятность прямых потоков С была достаточно велика для всех пулов ОВ, то в варианте пар она резко снизилась.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что последовательность разложения ОВ в почвах следует континууму от свежих и частично разложенных растительных остатков в ЛФ<sub>СВ</sub> и ЛФ<sub>АГР</sub> до значительно/полностью переработанных – в Иле и Остатке, что находит отражение в “утяжелении” изотопной сигнатуры при переходе от дискретного ОВ к минерально-ассоциированному.

В условиях длительного режима чистого пара, в силу практически полного отсутствия свежего растительного материала в течение длительного времени изотопная сигнатура смещается в сторону “утяжеления” за счет субстратного эффекта, сопровождающегося усилением изотопной дискриминацией при увеличении количества циклов микробной утилизации.

Примененный в нашем исследовании подход (Gunina, Kuzyakov, 2014) продемонстрировал свою эффективность при отслеживании потоков С между пулами ОВ на основе естественных различий в стабильном изотопном составе С. Он хорошо отражает не только последовательность трансформации ОВ, но и локализацию разных пулов ОВ в почвенной матрице.

В варианте пар принципиальные пути преобразования ОВ остались прежними: из дискретного ОВ (ЛФ<sub>СВ</sub> и ЛФ<sub>АГР</sub>) к минерально-ассоциированному ОВ (Ил и Остаток). Тем не менее если в варианте степь вероятность прямых потоков С достаточно велика для всех пулов ОВ, то в варианте пар она резко снизилась за счет увеличения циклов микробного метаболизма и субстратных эффектов. Более того, мы полагаем, что выявленное резкое снижение вероятности прямых потоков С в системе пулов ОВ разной локализации в почвенной матрице в варианте пар, близкое к минимальной, свидетельствует в пользу приближения почвы, длительное время функционирующей в режиме чистого пара, по своему статусу к деградировавшему.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Артемяева З.С., Зазовская Э.П., Засухина Е.С., Цомаева Е.В.* Изотопный состав углерода органического вещества водоустойчивых структурных отдельностей типичного чернозема в контрастных вариантах землепользования // Почвоведение. 2023а. № 3. С. 339–352.
2. *Данченко Н.Н., Артемяева З.С., Колягин Ю.Г., Когут Б.М.* Сравнительный анализ гумусовых веществ и органического вещества физических фракций чернозема типичного // Почвоведение. 2022. № 10. С. 1241–1254.
3. *Завьялова Н.Е., Васбиева М.Т., Фомин Д.С.* Микробная биомасса, дыхательная активность и азотфиксация в дерново-подзолистой почве предуралья при различном сельскохозяйственном использовании // Почвоведение. 2020. № 3. С. 372–378.
4. *Alvaro-Fuentes J., Arrue J.L., Cantero-Martinez C., Lopez M.V.* Aggregate breakdown during tillage in a Mediterranean loamy soil // Soil Till. Res. 2008. Vol. 101. P. 62–68.
5. *Artemyeva Z., Danchenko N., Kolyagin Yu., Kirillova N., Kogut B.* Chemical structure of soil organic matter and its role in aggregate formation in Haplic Chernozem under the contrasting land use variants // Catena. 2021b. Vol. 204. P. 105403.
6. *Asano M., Wagai R.* Evidence of aggregate hierarchy at micro- to submicron scales in an allophanic Andisol // Geoderma. 2014. Vol. 216. P. 62–74.
7. *Atere C.T., Gunina A., Zhu Z., Xiao M., Liu Sh., Kuzyakov Y., Chen L., Deng Y., Wu J., Ge T.* Organic matter stabilization in aggregates and density fractions in paddy soil depending on long-term fertilization: Tracing of pathways by  $^{13}\text{C}$  natural abundance // Soil Biol. Biochem. 2020. Vol. 149. P. 107931.
8. *Boström B.* Achieving carbon isotope mass balance in northern forest soils, soil respiration and fungi. Orebro. 2008.
9. *Badeck F.W., Tcherkez G., Nogués S., Piel C., Ghashghaie J.* Post-photosynthetic fractionation of stable carbon isotopes between plant organs – a widespread phenomenon // Rapid Commun. Mass Spectrom. 2005. Vol. 19. P. 1381–1391.
10. *Baisden W.T., Amundson R., Cook A.C., Brenner D.L.* Turnover and storage of C and N in five density fractions from California annual grassland surface soils // Glob. Biogeochem. Cycles. 2002. Vol. 16. P. 117–132.
11. *Balesdent J., Mariotti A.* Measurement of soil organic matter turnover using  $^{13}\text{C}$  natural abundance, in: *T.W. Boutto, S.I. Yamasaki* (Eds.), *Mass Spectrometry of Soils*, Marcel Dekker, New-York, 1996, P. 83–111.

12. *Balesdent J., Mariotti A., Guillet B.* Natural  $^{13}\text{C}$  abundance as a tracer for studies of soil organic matter dynamics // *Soil Biol. Biochem.* 1987. Vol. 19. P. 25–30.
13. *Basile-Doelsch I., Balesdent J., Pellerin S.* Reviews and syntheses: The mechanisms underlying carbon storage in soil // *Biogeosciences.* 2020. Vol. 17. P. 5223–5242.
14. *Bol R.A., Harkness D.D., Huang Y., Howard D.M.* The influence of soil processes on carbon isotope distribution and turnover in the British uplands // *Eur. J. Soil Sci.* 1999. Vol. 50. P. 41–51.
15. *Bonde T.A., Christensen B.T., Cerri C.C.* Dynamics of soil organic matter as reflected by natural  $^{13}\text{C}$  abundance in particle size fractions of forested and cultivated Oxisols // *Soil Biol. Biochem.* 1992. Vol. 24. P. 275–77.
16. *Cambardella C.A., Elliott. E.T.* Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1992. Vol. 56. P. 777–783.
17. *Cheng X., Luo Y., Xu X., Sherry R., Zhang Q.* Soil organic matter dynamics in a North America tallgrass prairie after 9 yr of experimental warming // *Biogeosciences.* 2011. Vol. 8. P. 1487–1498.
18. *Chenu C., Plante A.F.* Clay-sized organo-mineral complexes in a cultivation chronosequence: revisiting the concept of the “organo-mineral complex” // *Euro. J. Soil Sci.* 2006. Vol. 57. P. 596–607.
19. *Connin S.L., Feng X., Virginia R.A.* Isotopic discrimination during long-term decomposition in an arid land ecosystem // *Soil Biol. Biochem.* 2001. Vol. 33. P. 41–51.
20. *Crow E.S., Sulzman E.W., Rugh W.D., Bowden R.D., Lajtha K.* Isotopic analysis of respired  $\text{CO}_2$  during decomposition of separate soil organic matter pools // *Soil Biol. Biochem.* 2006. Vol. 38. P. 3279–3291.
21. *Crow S.E., Swanston C.W., Lajtha K., Brooks J.R., Keirstead H.* Density fractionation of forest soils: methodological questions and interpretation of incubation results and turnover time in an ecosystem context // *Biochem.* 2007. Vol. 85. P. 69–90.
22. *del Galdo I., Six J., Peressotti A., Cotrufo M.F.* Assessing the impact of land-use change on soil C sequestration in agricultural soils by means of organic matter fractionation and stable C isotopes // *Global Change Biology.* 2003. Vol. 9. P. 1204–1213.
23. *Dorodnikov M., Kuzyakov Y., Fangmeier A., Wiesenberg G.L.B.* C and N in soil organic matter density fractions under elevated atmospheric  $\text{CO}_2$ : turnover vs. stabilization // *Soil Biol. Biochem.* 2011. Vol. 43. P. 579–589.
24. *Ehleringer J.R., Buchmann N., Flanagan L.B.* Carbon isotope ratios in belowground carbon cycle processes // *Ecol. Appl.* 2000. Vol. 10. P. 412–422.

25. *Fernández I., Mahieu N., Cadisch G.* Carbon isotope fractionation during decomposition of plant materials of different quality // *Global Biogeochem. Cycles*. 2003. Vol. 17. P. 1–1.
26. *Golchin A., Oades J.M., Skjemstad J.O., Clarke P.* Soil structure and carbon cycling // *Aust. J. Soil Res.* 1994. Vol. 32.
27. *Golchin A., Oades J.M., Skjemstad J.O., Clarke P.* Structural and dynamic properties of soil organic matter as reflected by  $^{13}\text{C}$  natural abundance, pyrolysis mass spectrometry and solid-state  $^{13}\text{C}$  NMR spectroscopy in density fractions of an Oxisol under forest and pasture // *Austral. J. Soil Res.* 1995. Vol. 33. P. 59–76.
28. *Golchin A., Baldock J.A., Clarke P., Higashi T., Oades J.M.* The effects of vegetation and burning on the chemical composition of soil organic matter of a volcanic ash soil as shown by  $\text{C-}^{13}\text{NMR}$  spectroscopy. 2. Density fractions // *Geoderma*. 1997. Vol. 76. P. 175–192.
29. *Gregorich E.G., Drury C.F., Ellert B.H., Liang B.C.* Fertilization effects on physically protected light fraction organic matter // *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1997. Vol. 61. P. 482–484.
30. *Gunina A., Kuzyakov Y.* Pathways of litter C by formation of aggregates and SOM density fractions: implications from  $^{13}\text{C}$  natural abundance // *Soil Biol. Biochem.* 2014. Vol. 71. P. 95–104.
31. *He Y., Siemens J., Amelung W., Goldbach H., Wassmann R., Alberto M.C.R., Lücke A., Lehndorff E.* Carbon release from rice roots under paddy rice and maize-paddy rice cropping // *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2015. Vol. 210. P. 15–24.
32. *Hobbie E., Colpaert J.* Nitrogen availability and mycorrhizal colonization influence water use efficiency and carbon isotope patterns in *Pinus sylvestris* // *New Phytol.* 2004. Vol. 164. P. 515–525.
33. *Jastrow J.D.* Soil aggregate formation and the accrual of particulate and mineral associated organic matter // *Soil Biol. Biochem.* 1996. Vol. 28. P. 656–676.
34. *Jensen J.L., Schjønning P., Watts C.W., Christensen B.T., Munkholm L.J.* Short-term changes in soil pore size distribution: Impact of land use // *Soil Till. Res.* 2020. Vol. 199. P. 104597.
35. *John B., Yamashita T., Ludwig B., Flessa H.* Storage of organic carbon in aggregate and density fractions of silty soils under different types of land use // *Geoderma*. 2005. Vol. 128. P. 63–79.
36. *Kot A., Frąc M., Lipiec J., Usowicz B.* Biological activity and microbial genetic diversity of bare-fallow and grassland soils // *Acta Agri. Scand. Section B – Soil & Plant Sci.* 2015. Vol. 65. P. 648–657.
37. *Lal R.* Carbon sequestration // *Philos. Trans. Roy. Soc.* 2008. Vol. B 363. P. 815–830.

38. *Lehmann J., Kleber M.* The contentious nature of soil organic matter // *Nature*. 2015. Vol. 528. P. 60–68.
39. *Liu Y., Hu C., Hu W., Wang L., Li Z., Pan J., Chen F.* Stable isotope fractionation provides information on carbon dynamics in soil aggregates subjected to different long-term fertilization practices // *Soil and Tillage Res.* 2018. Vol. 177. P. 54–60.
40. *Llorente M., Glaser B., Turrión M.B.* Anthropogenic disturbance of natural forest vegetation on calcareous soils alters soil organic matter composition and natural abundance of  $^{13}\text{C}$  and  $^{15}\text{N}$  in density fractions // *Eur. J. Forest Res.* 2010. Vol. 129. P. 1143–1153.
41. *Menichetti L., Houot S., van Oort F., Kätterer T., Christensen B.T., Chenu C., Barré P., Vasilyeva N.A., Ekblad A.* Increase in soil stable carbon isotope ratio relates to loss of organic carbon: results from five long-term bare fallow experiments // *Oecologia*. 2015. Vol. 177. P. 811–821.
42. *Oades J.M., Waters A.G.* Aggregate hierarchy in soils // *Austral. J. Soil Res.* 1991. Vol. 29. P. 815–828.
43. *Olk D.C., Gregorich G.* Overview of the Symposium Proceedings, “Meaningful Pools in Determining Soil Carbon and Nitrogen Dynamics” // *Soil Sci. Soc. Am. J.* 2006. Vol. 70. P. 967–974.
44. *Park R., Epstein S.* Carbon isotope fractionation during photosynthesis // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1960. Vol. 21. P. 110–26.
45. *Piccolo A., Spaccini R., Nieder R., Richter J.* Sequestration of a biologically labile organic carbon in soils by humified organic matter // *Climatic Change*. 2004. Vol. 67. P. 329–343.
46. *Powers J.S., Schlesinger W.H.* Geographic and vertical patterns of stable carbon isotopes in tropical rain forest soils of Costa Rica // *Geoderma*. 2002. Vol. 109. P. 141–160.
47. *Preston C.M., Nault J.R., Trofymow J.A.* Chemical changes during 6 years of decomposition of 11 litters in some Canadian forest sites. Part 2.  $^{13}\text{C}$  Abundance, solid-state  $^{13}\text{C}$  NMR spectroscopy and the meaning of “lignin” // *Ecosystems*. 2009. Vol. 12. P. 1078–1102.
48. *Puget P., Chenu C., Balesdent J.* Total and young organic carbon distributions in aggregates of silty cultivated soils // *Europ. J. Soil Sci.* 1995. Vol. 46. P. 449–459.
49. *Rasmussen C., Torn M.S., Southard R.J.* Mineral assemblage and aggregates control carbon dynamics in a California conifer forest // *Soil Sci. Soc. Am. J.* 2005. Vol. 69. P. 1711–1721.
50. *Šantručková H., Bird M.I., Lloyd J.* Microbial processes and carbon-isotope fractionation in tropical and temperate grassland soils // *Funct. Ecol.* 2000. Vol. 14. P. 108–114.
51. *Schweizer S.A., Aehnelt M., Bucka F., Totsche K.U., Kögel-Knabner I.*

Impact of bare fallow management on soil carbon storage and aggregates across a rock fragment gradient // *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 2024. P. 1–12.

52. *Six J., Bossuyt H., Degryze S., Denef K.* A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics // *Soil Till. Res.* 2004. Vol. 79. P. 7–31.

53. *Six J., Elliot E.T., Paustian K., Doran J.W.* Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils // *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1998. Vol. 62. P. 1367–1377.

54. *Six J., Guggenberger G., Paustian K., Haumaier L., Elliott E.T., Zech W.* Sources and composition of soil organic matter fractions between and within soil aggregates // *Eur. J. Soil Sci.* 2001. Vol. 52. P. 607–618.

55. *Soinne H., Hyvaluoma J., Ketoja E., Turtola E.* Relative importance of organic carbon, land use and moisture conditions for the aggregate stability of post-glacial clay soils // *Soil Till. Res.* 2016. Vol. 158. P. 1–9.

56. *Sollins P., Kramer M., Swanston C., Lajtha K., Filley T., Aufdenkampe A., Wagai R., Bowden R.* Sequential density fractionation across soils of contrasting mineralogy: evidence for both microbial- and mineral-controlled soil organic matter stabilization // *Biochem.* 2009. Vol. 96. P. 209–231.

57. *Tisdall J.M., Oades J.M.* Organic matter and water-stable aggregates in soils // *J. Soil Sci.* 1982. Vol. 33. P. 141–163.

58. *Wagai R., Mayer L.M., Kitayama K.* Nature of the “occluded” low-density fraction in soil organic matter studies: A critical review // *Soil Sci. Plant Nutr.* 2009. Vol. 55. P. 13–25.

59. *Wedin D.A., Tieszed L.L., Dewey B., Pastor J.* Carbon isotope dynamics during grass decomposition and soil organic matter formation // *Ecology.* 1995. Vol. 76. P. 1383–1392.

60. *Werth M., Kuzyakov Y.* <sup>13</sup>C fractionation at the root-microorganisms-soil interface: a review and outlook for partitioning studies // *Soil Biol. Biochem.* 2010. Vol. 42. P. 1372–1384.

61. World Reference Base for Soil Resources. International Soil Classification System for Naming Soils and Creating Legends for Soil Maps; International Union of Soil Sciences (IUSS), Vienna, 2022, 236 p.

## REFERENCES

1. Artemyeva Z.S., Zazovskaya E.P., Zasukhina E.S., Tsomaeva E.V., Izotopnyy sostav ugleroda organicheskogo veshchestva vodoustoychivyykh strukturnykh otdel'nostey tipichnogo chernozema v kontrastnykh variantakh zemlepol'zovaniya (Isotopic composition of organic matter carbon in water-stable structural units of typical chernozem in contrasting land use variants),

*Pochvovedenie*, 2023a, No. 3, pp. 339–352.

2. Danchenko N.N., Artemyeva Z.S., Kolyagin Yu.G., Kogut B.M., Sravnitel'nyy analiz gumusovykh veshchestv i organicheskogo veshchestva fizicheskikh fraktsiy chernozema tipichnogo (Comparative analysis of humic substances and organic matter of physical fractions of typical chernozem), *Pochvovedenie*, 2022, No. 10, pp. 1241–1254.

3. Zavyalova N.E., Vasbieva M.T., Fomin D.S., Mikrobnaya biomassa, dykhatel'naya aktivnost' i azotifikatsiya v dernovo-podzolistoy pochve predural'ya pri razlichnom sel'skokhozyaystvennom ispol'zovanii (Microbial biomass, respiratory activity and nitrogen fixation in sod-podzolic soil of the Urals region under different agricultural use), *Pochvovedenie*, 2020, No. 3, pp. 372–378.

4. Alvaro-Fuentes J., Arrue J.L., Cantero-Martinez C., Lopez M.V., Aggregate breakdown during tillage in a Mediterranean loamy soil, *Soil Till. Res.*, 2008, Vol. 101, pp. 62–68.

5. Artemyeva Z., Danchenko N., Kolyagin Yu., Kirillova N., Kogut B., Chemical structure of soil organic matter and its role in aggregate formation in Haplic Chernozem under the contrasting land use variants, *Catena*, 2021b, Vol. 204, pp. 105403.

6. Asano M., Wagai R., Evidence of aggregate hierarchy at micro- to submicron scales in an allophanic Andisol, *Geoderma*, 2014, Vol. 216, pp. 62–74.

7. Atere C.T., Gunina A., Zhu Z., Xiao M., Liu Sh., Kuzyakov Y., Chen L., Deng Y., Wu J., Ge T., Organic matter stabilization in aggregates and density fractions in paddy soil depending on long-term fertilization: Tracing of pathways by  $^{13}\text{C}$  natural abundance, *Soil Biol. Biochem.*, 2020, Vol. 149, pp. 107931.

8. Boström B., *Achieving carbon isotope mass balance in northern forest soils, soil respiration and fungi*, Orebro, 2008.

9. Badeck F.W., Tcherkez G., Nogués S., Piel C., Ghashghaie J., Post-photosynthetic fractionation of stable carbon isotopes between plant organs – a widespread phenomenon, *Rapid Commun. Mass Spectrom.*, 2005, Vol. 19, pp. 1381–1391.

10. Baisden W.T., Amundson R., Cook A.C., Brenner D.L., Turnover and storage of C and N in five density fractions from California annual grassland surface soils, *Glob. Biogeochem. Cycles.*, 2002, Vol. 16, pp. 117–132.

11. Balesdent J., Mariotti A., Measurement of soil organic matter turnover using  $^{13}\text{C}$  natural abundance, In: T.W. Boutto, S.I. Yamasaki (Eds.), *Mass Spectrometry of Soils*, New-York: Marcel Dekker, 1996, pp. 83–111.

12. Balesdent J., Mariotti A., Guillet B., Natural  $^{13}\text{C}$  abundance as a tracer for studies of soil organic matter dynamics, *Soil Biol. Biochem.*, 1987, Vol. 19,

pp. 25–30.

13. Basile-Doelsch I., Balesdent J., Pellerin S., Reviews and syntheses: The mechanisms underlying carbon storage in soil, *Biogeosciences*, 2020, Vol. 17, pp. 5223–5242.

14. Bol R.A., Harkness D.D., Huang Y., Howard D.M., The influence of soil processes on carbon isotope distribution and turnover in the British uplands, *Eur. J. Soil Sci.*, 1999, Vol. 50, pp. 41–51.

15. Bonde T.A., Christensen B.T., Cerri C.C., Dynamics of soil organic matter as reflected by natural  $^{13}\text{C}$  abundance in particle size fractions of forested and cultivated Oxisols, *Soil Biol. Biochem.*, 1992, Vol. 24, pp. 275–77.

16. Cambardella C.A., Elliott. E.T., Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1992, Vol. 56, pp. 777–783.

17. Cheng X., Luo Y., Xu X., Sherry R., Zhang Q., Soil organic matter dynamics in a North America tallgrass prairie after 9 yr of experimental warming, *Biogeosciences*, 2011, Vol. 8, pp. 1487–1498.

18. Chenu C., Plante A.F., Clay-sized organo-mineral complexes in a cultivation chronosequence: revisiting the concept of the “organo-mineral complex”, *Europ. J. Soil Sci.*, 2006, Vol. 57, pp. 596–607.

19. Connin S.L., Feng X., Virginia R.A., Isotopic discrimination during long-term decomposition in an arid land ecosystem, *Soil Biol. Biochem.*, 2001, Vol. 33, pp. 41–51.

20. Crow E.S., Sulzman E.W., Rugh W.D., Bowden R.D., Lajtha K., Isotopic analysis of respired  $\text{CO}_2$  during decomposition of separate soil organic matter pools, *Soil Biol. Biochem.*, 2006, Vol. 38, pp. 3279–3291.

21. Crow S.E., Swanston C.W., Lajtha K., Brooks J.R., Keirstead H., Density fractionation of forest soils: methodological questions and interpretation of incubation results and turnover time in an ecosystem context, *Biochem.*, 2007, Vol. 85, pp. 69–90.

22. del Galdo I., Six J., Peressotti A., Cotrufo M.F., Assessing the impact of land-use change on soil C sequestration in agricultural soils by means of organic matter fractionation and stable C isotopes, *Global Change Biology*, 2003, Vol. 9, pp. 1204–1213.

23. Dorodnikov M., Kuzyakov Y., Fangmeier A., Wiesenberg G.L.B., C and N in soil organic matter density fractions under elevated atmospheric  $\text{CO}_2$ : turnover vs. stabilization, *Soil Biol. Biochem.*, 2011, Vol. 43, pp. 579–589.

24. Ehleringer J.R., Buchmann N., Flanagan L.B., Carbon isotope ratios in belowground carbon cycle processes, *Ecol. Appl.*, 2000, Vol. 10, pp. 412–422.

25. Fernández I., Mahieu N., Cadisch G., Carbon isotope fractionation during decomposition of plant materials of different quality, *Global Biogeochem. Cycles.*, 2003, Vol. 17, pp. 1–1.

26. Golchin A., Oades J.M., Skjemstad J.O., Clarke P., Soil structure and carbon cycling, *Aust. J. Soil Res.*, 1994, Vol. 32.
27. Golchin A., Oades J.M., Skjemstad J.O., Clarke P., Structural and dynamic properties of soil organic matter as reflected by  $^{13}\text{C}$  natural abundance, pyrolysis mass spectrometry and solid-state  $^{13}\text{C}$  NMR spectroscopy in density fractions of an Oxisol under forest and pasture, *Austral. J. Soil Res.*, 1995, Vol. 33, pp. 59–76.
28. Golchin A., Baldock J.A., Clarke P., Higashi T., Oades J.M., The effects of vegetation and burning on the chemical composition of soil organic matter of a volcanic ash soil as shown by  $\text{C-}^{13}\text{NMR}$  spectroscopy. 2. Density fractions, *Geoderma*, 1997, Vol. 76, pp. 175–192.
29. Gregorich E.G., Drury C.F., Ellert B.H., Liang B.C., Fertilization effects on physically protected light fraction organic matter, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1997, Vol. 61, pp. 482–484.
30. Gunina A., Kuzyakov Y., Pathways of litter C by formation of aggregates and SOM density fractions: implications from  $^{13}\text{C}$  natural abundance, *Soil Biol. Biochem.*, 2014, Vol. 71, pp. 95–104.
31. He Y., Siemens J., Amelung W., Goldbach H., Wassmann R., Alberto M.C.R., Lücke A., Lehndorff E., Carbon release from rice roots under paddy rice and maize-paddy rice cropping, *Agriculture, Ecosystems & Environmen*, 2015, Vol. 210, pp. 15–24.
32. Hobbie E., Colpaert J., Nitrogen availability and mycorrhizal colonization influence water use efficiency and carbon isotope patterns in *Pinus sylvestris*, *New Phytol.*, 2004, Vol. 164, pp. 515–525.
33. Jastrow J.D., Soil aggregate formation and the accrual of particulate and mineral associated organic matter, *Soil Biol. Biochem.*, 1996, Vol. 28, pp. 656–676.
34. Jensen J.L., Schjønning P., Watts C.W., Christensen B.T., Munkholm L.J., Short-term changes in soil pore size distribution: Impact of land use, *Soil Till. Res.*, 2020, Vol. 199, pp. 104597.
35. John B., Yamashita T., Ludwig B., Flessa H., Storage of organic carbon in aggregate and density fractions of silty soils under different types of land use, *Geoderma*, 2005, Vol. 128, pp. 63–79.
36. Kot A., Fraç M., Lipiec J., Usowicz B., Biological activity and microbial genetic diversity of bare-fallow and grassland soils, *Acta Agri. Scand. Section B – Soil & Plant Sci.*, 2015, Vol. 65, pp. 648–657.
37. Lal R., Carbon sequestration, *Philos. Trans. Roy. Soc.*, 2008, Vol. B 363, pp. 815–830.
38. Lehmann J., Kleber M., The contentious nature of soil organic matter, *Nature*, 2015, Vol. 528, pp. 60–68.
39. Liu Y., Hu C., Hu W., Wang L., Li Z., Pan J., Chen F., Stable isotope

fractionation provides information on carbon dynamics in soil aggregates subjected to different long-term fertilization practices, *Soil and Tillage Res.*, 2018, Vol. 177, pp. 54–60.

40. Llorente M., Glaser B., Turrión M.B., Anthropogenic disturbance of natural forest vegetation on calcareous soils alters soil organic matter composition and natural abundance of  $^{13}\text{C}$  and  $^{15}\text{N}$  in density fractions, *Eur. J. Forest Res.*, 2010, Vol. 129, pp. 1143–1153.

41. Menichetti L., Houot S., van Oort F., Kätterer T., Christensen B.T., Chenu C., Barré P., Vasilyeva N.A., Ekblad A., Increase in soil stable carbon isotope ratio relates to loss of organic carbon: results from five long-term bare fallow experiments, *Oecologia*, 2015, Vol. 177, pp. 811–821.

42. Oades J.M., Waters A.G., Aggregate hierarchy in soils, *Austral. J. Soil Res.*, 1991, Vol. 29, pp. 815–828.

43. Olk D.C., Gregorich G., Overview of the Symposium Proceedings, “Meaningful Pools in Determining Soil Carbon and Nitrogen Dynamics”, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2006, Vol. 70, pp. 967–974.

44. Park R., Epstein S., Carbon isotope fractionation during photosynthesis, *Geochim. Cosmochim. Acta.*, 1960, Vol. 21, pp. 110–26.

45. Piccolo A., Spaccini R., Nieder R., Richter J., Sequestration of a biologically labile organic carbon in soils by humified organic matter, *Climatic Change*, 2004, Vol. 67, pp. 329–343.

46. Powers J.S., Schlesinger W.H., Geographic and vertical patterns of stable carbon isotopes in tropical rain forest soils of Costa Rica, *Geoderma*, 2002, Vol. 109, pp. 141–160.

47. Preston C.M., Nault J.R., Trofymow J.A., Chemical changes during 6 years of decomposition of 11 litters in some Canadian forest sites. Part 2.  $^{13}\text{C}$  Abundance, solid-state  $^{13}\text{C}$  NMR spectroscopy and the meaning of “lignin”, *Ecosystems*, 2009, Vol. 12, pp. 1078–1102.

48. Puget P., Chenu C., Balesdent J., Total and young organic carbon distributions in aggregates of silty cultivated soils, *Europ. J. Soil Sci.*, 1995, Vol. 46, pp. 449–459.

49. Rasmussen C., Torn M.S., Southard R.J., Mineral assemblage and aggregates control carbon dynamics in a California conifer forest, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2005, Vol. 69, pp. 1711–1721.

50. Šantručková H., Bird M.I., Lloyd J., Microbial processes and carbon-isotope fractionation in tropical and temperate grassland soils, *Funct. Ecol.*, 2000, Vol. 14, pp. 108–114.

51. Schweizer S.A., Aehnelt M., Bucka F., Totsche K.U., Kögel-Knabner I., Impact of bare fallow management on soil carbon storage and aggregates across a rock fragment gradient, *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 2024, pp. 1–12.

52. Six J., Bossuyt H., Degryze S., Denef K., A history of research on the link

between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics, *Soil Till. Res.*, 2004, Vol. 79, pp. 7–31.

53. Six J., Elliot E.T., Paustian K., Doran J.W., Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1998, Vol. 62, pp. 1367–1377.

54. Six J., Guggenberger G., Paustian K., Haumaier L., Elliott E.T., Zech W., Sources and composition of soil organic matter fractions between and within soil aggregates, *Eur. J. Soil Sci.*, 2001, Vol. 52, pp. 607–618.

55. Soinne H., Hyvaluoma J., Ketoja E., Turtola E., Relative importance of organic carbon, land use and moisture conditions for the aggregate stability of post-glacial clay soils, *Soil Till. Res.*, 2016, Vol. 158, pp. 1–9.

56. Sollins P., Kramer M., Swanston C., Lajtha K., Filley T., Aufdenkampe A., Wagai R., Bowden R., Sequential density fractionation across soils of contrasting mineralogy: evidence for both microbial- and mineral-controlled soil organic matter stabilization, *Biochem.*, 2009, Vol. 96, pp. 209–231.

57. Tisdall J.M., Oades J.M., Organic matter and water-stable aggregates in soils, *J. Soil Sci.*, 1982, Vol. 33, pp. 141–163.

58. Wagai R., Mayer L.M., Kitayama K., Nature of the “occluded” low-density fraction in soil organic matter studies: A critical review, *Soil Sci. Plant Nutr.*, 2009, Vol. 55, pp. 13–25.

59. Wedin D.A., Tieszed L.L., Dewey B., Pastor J., Carbon isotope dynamics during grass decomposition and soil organic matter formation, *Ecology*, 1995, Vol. 76, pp. 1383–1392.

60. Werth M., Kuzyakov Y., <sup>13</sup>C fractionation at the root-microorganisms-soil interface: a review and outlook for partitioning studies, *Soil Biol. Biochem.*, 2010, Vol. 42, pp. 1372–1384.

61. World Reference Base for Soil Resources. International Soil Classification System for Naming Soils and Creating Legends for Soil Maps; International Union of Soil Sciences (IUSS), Vienna, 2022, 236 p.

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2026-127-243-265



### Ссылки для цитирования:

Чекин Г.В., Нечаев М.М. Некоторые особенности содержания тяжелых металлов в аллювиальных почвах р. Десны // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2026. Вып. 127. С. 243-265. DOI: 10.19047/0136-1694-2026-127-243-265

### Cite this article as:

Chekin G.V., Nechaev M.M., Some features of trace element content in alluvial soils of the Desna River, Dokuchaev Soil Bulletin, 2026, V. 127, pp. 243-265, DOI: 10.19047/0136-1694-2026-127-243-265

## Некоторые особенности содержания тяжелых металлов в аллювиальных почвах р. Десны

© 2026 г. Г. В. Чекин\*, М. М. Нечаев

ФГБОУ ВО Брянский ГАУ,  
243365, Брянская обл., Выгоничский р-н, с. Кокино, Советская, 2а,  
\*e-mail: [gb-swamp@yandex.ru](mailto:gb-swamp@yandex.ru).

Поступила в редакцию 27.04.2025, после доработки 05.06.2025,  
принята к публикации 27.01.2026

**Резюме:** Представлены результаты исследования валового содержания и содержания подвижных форм Cd, Pb, Zn, Cu, Ni, Co и Cr. Исследования проводили на территории Брянской области, Россия, в ландшафтах поймы реки Десны. Отбор почвенных образцов проводили методом почвенных ключей (92 почвенных разреза). Показана высокая вариабельность валового содержания и подвижных форм Cd, Pb, Zn, Cu, Ni, Co и Cr в аллювиальных почвах р. Десны. Установлено наличие корреляционной связи между валовым содержанием тяжелых металлов в почве и ее гранулометрическим составом. По величине кларка концентрации элементы сгруппированы в убывающий ряд: Cu > Pb > Zn > Co > Ni > Cr > Cd, аналогичный для аллювиальных почв других рек региона. Составлен геохимический индекс пойменных почв р. Десны, который позволяет судить о потенциальном запасе тяжелых металлов. Установлен ряд подвижности тяжелых металлов: Cd > Ni > Pb > Zn > Cu > Co > Cr, аналогичный почвам другого генезиса. Установлено наличие корреляционной связи между содержанием подвижных форм Cd, Cu, Ni и Co и содержанием физической глины в почве. Показана степень

обеспеченности Zn, Cu и Co пойменных почв реки Десны. Отмечена необходимость в дополнительном их количестве при выращивании сельскохозяйственной продукции.

**Ключевые слова:** аллювиальные почвы; тяжелые металлы; кларк концентрации.

## Some features of trace element content in alluvial soils of the Desna River

© 2026 G. V. Chekin\*, M. M. Nechaev

*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education  
Bryansk State Agrarian University,  
2a Sovetskaya Str., Kokino Village 243365, Vygonichsky District,  
Bryansk Region, Russian Federation,  
\*e-mail: [gb-swamp@yandex.ru](mailto:gb-swamp@yandex.ru).*

*Received 27.04.2025, Revised 05.06.2025, Accepted 27.01.2026*

**Abstract:** The results of the study of the total amount and mobile forms of Cd, Pb, Zn, Cu, Ni, Co and Cr are presented. The studies were conducted in the Bryansk Region, Russia, in the landscapes of the Desna River floodplain. Soil samples were collected using the soil key method (92 soil pits). High variability of gross amount and mobile forms of cadmium, lead, zinc, copper, nickel, cobalt and chromium in alluvial soils of the Desna River is shown. The presence of a correlation between the gross content of trace elements in the soil and its granulometric composition is established. According to the concentration clarke value, the elements are grouped in a descending series: Cu > Pb > Zn > Co > Ni > Cr > Cd, similar to that in alluvial soils of other rivers in the region. A geochemical index of floodplain soils of the Desna River has been compiled, which allows one to judge the potential reserve of trace elements. The mobility series of trace elements Cd > Ni > Pb > Zn > Cu > Co > Cr has been established, similar to that in soils of a different genesis. A correlation has been established between the content of the mobile form of cadmium, copper, nickel and cobalt and the content of physical clay in the soil. The degree of zinc, copper and cobalt supply of floodplain soils of the Desna River is shown. The need for their additional amount when growing agricultural products is noted.

**Keywords:** alluvial soils; trace elements; concentration clarke.

### ВВЕДЕНИЕ

Пойма как элемент ландшафта, образовавшись в результате

деятельности реки, отличается крайней неоднородностью структуры, обусловленной русловыми процессами. Это в свою очередь приводит к формированию специфических аллювиальных почв, развивающихся в условиях периодического затопления. Являясь своеобразным геохимическим аккумулятором в силу генезиса и положения в рельефе, эти почвы могут накапливать широкий спектр веществ как естественного, так и антропогенного происхождения, которые переносятся либо в растворенной форме с водными потоками, либо со взвешенными частицами (Балабко и др., 2016; Просянных, 2012; Izquierdo et al., 2013; Kałmykow-Piwińska et al., 2020).

Целью данной работы является составление представления о валовом содержании некоторых тяжелых металлов в аллювиальных почвах реки Десны, их подвижности и взаимосвязи с гранулометрическим составом, а также обеспеченности растений биофильными элементами. Данные вопросы приобретают все большую актуальность в связи с растущим антропогенным давлением на пойменные ландшафты, включая вовлечение их в сельскохозяйственное производство.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводили на территории Брянской области (Россия), в ландшафтах поймы реки Десны (рис. 1). Каждая точка пробоотбора (ключевой почвенный участок) представляет собой полнопрофильный почвенный разрез и четыре полуямы для уточнения варьирования границ горизонтов. Всего заложено 92 почвенных разреза. Образцы отбирались со стенок разрезов по генетическим горизонтам, перемешивались и усреднялись методом квартования. Отобранные образцы высушивались в естественных условиях и измельчались для проведения дальнейших анализов.

В образцах определяли следующие показатели:

- валовое содержание тяжелых металлов (методика М-МВИ-80-2008; п. 3.8.4.; метод определения – атомно-абсорбционный);
- подвижные формы Cd, Pb, Zn, Cu, Ni, Co, Cr (методика РД 52.18.289; п. 4, 5; метод определения – атомно-абсорбционный);
- гранулометрический состав по Н.А. Качинскому.

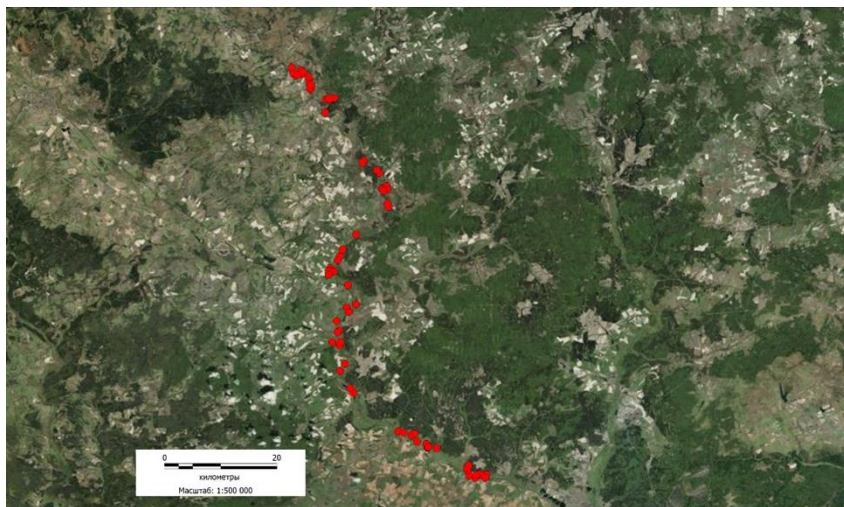
Анализы выполнены в испытательной лаборатории Центра

коллективного пользования на научном оборудовании при ФГБОУ ВО Брянский ГАУ.

Статистическая обработка данных проводилась в программах Excel v. 2019 и Statistica v.12.

Для характеристики степени концентрирования или рассеяния тяжелых металлов в почвах рассчитывали кларк концентрации (Прохорова, 2004).

Для характеристики процессов накопления/рассеяния элементов в системе “почва–порода” рассчитывали коэффициент радиальной дифференциации (R) (Чекин, 2024).



**Рис. 1.** Расположение ключевых почвенных участков в ландшафтах поймы р. Десны.

**Fig. 1.** Location of key soil areas in the landscapes of the Desna River floodplain.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

### **Валовое содержание элементов в почвах**

Почвам поймы р. Десны свойственно большое разнообразие, обусловленное вариабельностью кислотности и гранулометрического состава (Кораблева, 1969).

Распределение элементов в почвенных горизонтах лимитируется рядом факторов, связанных прежде всего с элементарными процессами почвообразования, а также влиянием минералогии аллювиальных отложений, гранулометрии и геоморфологическими особенностями конкретного участка поймы (Протасова, Щербаков, 2004; Чекин и др., 2021; Шиманская, Позняк, 2016).

В таблице 1 представлены результаты описательной статистики содержания тяжелых металлов в почвах пойменного ландшафта. В.П. Самсонова указывает, что распределение отличается от нормального, если коэффициент вариации больше 35% (Самсонова, Мешалкина, 2020). В этом случае корректнее использовать медианное значение показателя, а не среднюю величину.

Содержание тяжелых металлов в аллювиальных почвах р. Десны варьирует в широких пределах. С целью определения закономерности пространственного распределения элементов в рассматриваемых почвах был проведен корреляционный анализ между гранулометрическими фракциями почвы и валовым содержанием элементов (рис. 2).

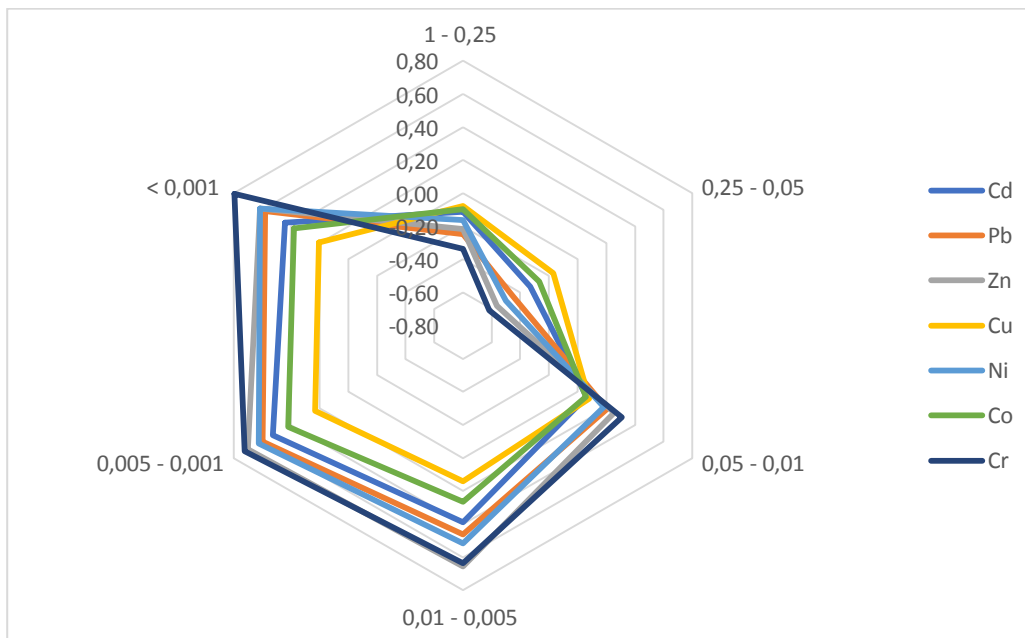
Для фракций 0.25–1.00 и 0.05–0.25 мм коэффициенты корреляции имеют отрицательное значение; для фракций 0.01–0.05 мм – положительное, значимое для меди, цинка, никеля и хрома; а для фракций 0.005–0.01, 0.001–0.005 и <0.001 мм корреляция положительная, значимая (рис. 3).

Полученные результаты свидетельствуют о наличии связи между содержанием тяжелых металлов в почве и ее гранулометрическим составом. В общем случае, чем тяжелее гранулометрический состав, тем больше, при прочих равных условиях, содержание тяжелых металлов. Однако данный фактор не является единственным. Двухвыборочный *F*-тест показал, что коэффициенты детерминации являются значимыми для зависимости валового содержания кадмия, свинца, никеля и кобальта от содержания частиц почвы с размером менее 0.01 мм. Для цинка, меди и никеля регрессия считается не значимой (рис. 4).

**Таблица 1.** Описательная статистика валового содержания тяжелых металлов в аллювиальных почвах поймы р. Десны

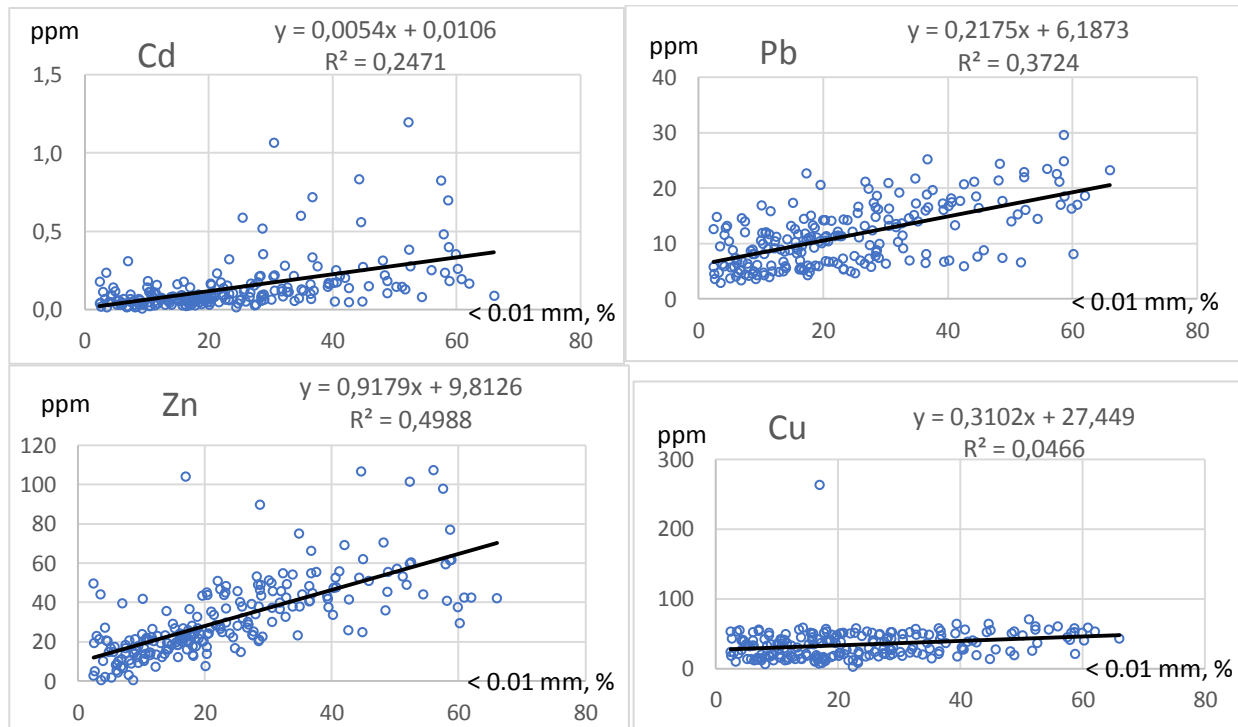
**Table 1.** Descriptive statistics of the gross content of heavy metals in alluvial soils of the Desna River floodplain

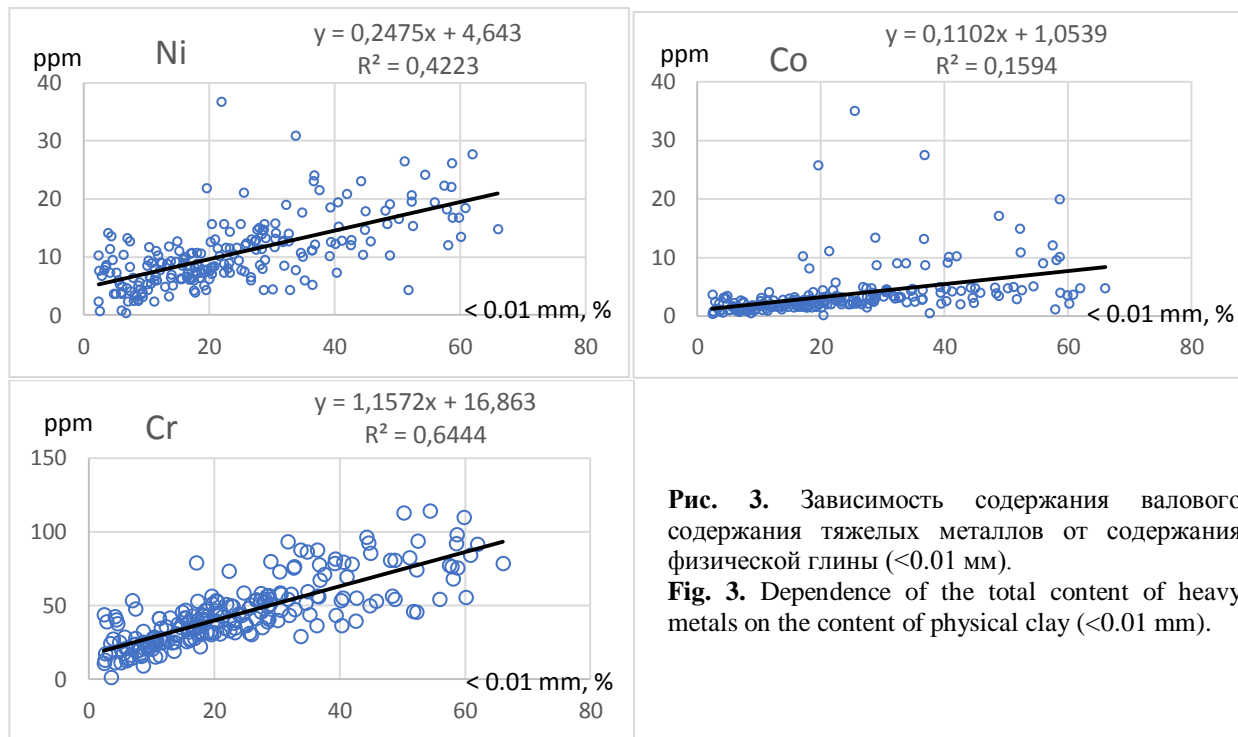
Показатель	Валовое содержание тяжелых металлов, ppm						
	Cd	Pb	Zn	Cu	Ni	Co	Cr
Среднее	0.138	11.36	31.65	34.83	10.53	3.68	44.39
Медиана	0.085	10.66	26.17	34.33	9.31	2.57	40.72
Эксцесс	15.00	-0.20	2.50	52.50	2.10	21.90	0.40
Асимметричность	3.50	0.70	1.30	5.20	1.20	4.10	0.80
Минимум	0.010	2.92	0.41	2.87	0.38	0.08	0.80
Максимум	1.198	29.60	107.30	263.20	36.80	35.00	113.80
Вариация, %	119.50	48.03	62.86	63.16	55.37	114.98	49.71



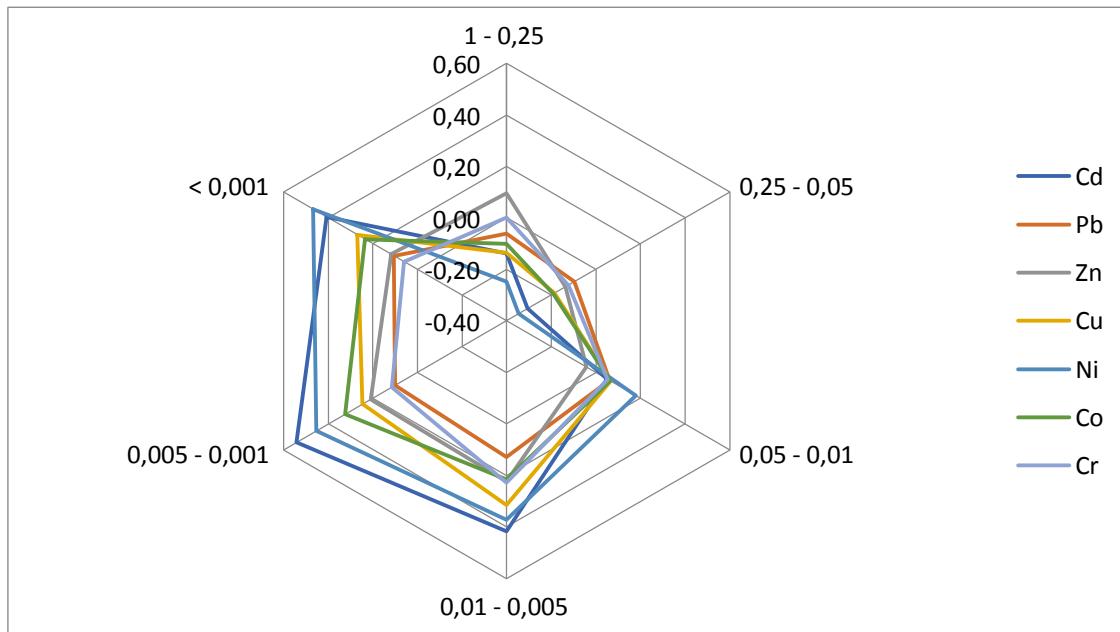
**Рис. 2.** Корреляционные матрицы валового содержания элементов, взаимосвязанных с разными гранулометрическими фракциями почвы.

**Fig. 2.** Correlation matrices of the gross content of elements associated with different granulometric fractions of soil.





**Рис. 3.** Зависимость содержания валового содержания тяжелых металлов от содержания физической глины (<0.01 мм).  
**Fig. 3.** Dependence of the total content of heavy metals on the content of physical clay (<0.01 mm).



**Рис. 4.** Корреляционные матрицы подвижных форм металлов взаимосвязанных с разными гранулометрическими фракциями почвы.

**Fig. 4.** Correlation matrices of mobile forms of metals interconnected with different granulometric fractions of soil.

Ряд авторов указывают на значимые корреляции между катионообменной емкостью, содержанием глины и содержанием металлов в пойменных почвах. Было обнаружено, что (гидр)оксиды Fe и Mn являются основными носителями для Cd, Zn и Ni в кислородных условиях, тогда как органическая фракция была наиболее важна для Cu. Растения могут влиять на подвижность металлов в пойменных почвах, окисляя их ризосферу, поглощая металлы, выделяя экссудаты и стимулируя активность микробных симбионтов в ризосфере (Du Laing et al., 2009; Hooda, 2010; Matys et al., 2016; McComb et al., 2015; Sabry et al., 2014). Ряд авторов подчеркивают выраженную биоаккумуляцию меди и кобальта, а также зависящую от реакции среды и окислительно-восстановительных условий аккумуляцию никеля (Кудашкин, 2003; Мартынов, 2019). Значение биоаккумуляции для накопления элементов отмечает также Л.П. Рыбашлыкова с соавторами, указывая на кобальт и хром (Рыбашлыкова, Конев, 2017).

Также накопление некоторых химических элементов в поверхностных горизонтах может свидетельствовать о значительном воздействии антропогенной деятельности (Чекин, Смольский, 2024).

По медиане валового содержания тяжелых металлов рассчитали значения кларка концентрации (КК), отражающие уровни накопления элементов в почве (табл. 2).

**Таблица 2.** Кларк концентрации тяжелых металлов в аллювиальных почвах поймы р. Десны

**Table 2.** Clarke of heavy metal concentration in alluvial soils of the Desna River floodplain

Показатель	Cd	Pb	Zn	Cu	Ni	Co	Cr
Медиана	0.17	1.07	0.53	1.71	0.23	0.32	0.20
Минимум	0.02	0.29	0.01	0.14	0.01	0.01	0.00
Максимум	2.40	2.98	2.16	13.13	0.93	4.31	0.57

При группировке КК, рассчитанного по медианному значению, в виде убывающего ряда получены следующие результаты:

$Cu > Pb > Zn > Co > Ni > Cr > Cd$ .

Сравнивая данный ряд с аналогичными рядами для пойм других рек региона (Чекин и др., 2021), необходимо отметить определенную их схожесть, в частности, по положению в ряду меди, свинца и цинка. Это может говорить о схожих геохимических условиях формирования аллювиальных почв различных рек региона.

О потенциальном запасе тяжелых металлов в аллювиальных почвах пойменных ландшафтов позволяет судить геохимический индекс:

$$Pb(1,07) \frac{Cu(1,71)}{Cd(0,17)Cr(0,20)Ni(0,23)Co(0,32)Zn(0,53)}$$

Рассматриваемые элементы, за исключением меди и свинца, относятся к группе рассеивающихся. Исключение составляет медь, относящаяся к группе накапливающихся элементов, и свинец, имеющий содержание близкое к кларку. Подобное превышение величины кларка, возможно, объясняется антропогенным влиянием. Однако необходимо учитывать, что усредненное содержание не отражает всего многообразия почвенных условий конкретного участка поймы, что подтверждается высокой вариабельностью показателя. Таким образом, средние значения кларка концентрации могут рассматриваться как некая базовая величина, с опорой на которую необходимо дальнейшее изучение данного вопроса.

Радиальная неоднородность содержания химических элементов зависит от распределения в почвенном профиле органических и минеральных веществ, гранулометрического состава пород, кислотного-основных и окислительно-восстановительных условий.

Установили, что коэффициент радиальной дифференциации для рассматриваемых элементов варьирует в широком диапазоне, и составляет следующие величины (табл. 3):

Медианные значения коэффициента радиальной дифференциации больше 1, что позволяет говорить преимущественно о процессах аккумуляции тяжелых металлов в почве относительно подстилающей породы.

**Таблица 3.** Коэффициенты радиальной дифференциации тяжелых металлов в почвах поймы р. Десны  
**Table 3.** Radial differentiation coefficients of heavy metals in the soils of the Desna River floodplain

<b>Показатель</b>	<b>Cd</b>	<b>Pb</b>	<b>Zn</b>	<b>Cu</b>	<b>Ni</b>	<b>Co</b>	<b>Cr</b>
Среднее	2.25	1.35	1.97	1.54	1.64	1.95	1.31
Медиана	1.72	1.18	1.35	1.13	1.20	1.12	1.12
Минимум	0.20	0.23	0.32	0.37	0.12	0.02	0.20
Максимум	10.16	4.03	11.28	22.04	16.86	55.50	4.86
Вариация, %	71.97	47.14	97.83	153.37	129.24	303.20	59.19

Однако на почвах ряда исследованных участков происходит обратный процесс – вынос элементов из почвенного профиля. При этом зависимости от гранулометрического состава почвы не установлено.

### **Содержание подвижных форм элементов**

Содержание подвижных форм тяжелых металлов дает представление об их биодоступности. Для анализа их содержания чаще всего используются агрохимические критерии оценки обеспеченности почв или же применяются ориентировочно допустимые концентрации (ОДК), но они разработаны не для всех элементов и отличаются в разных странах (Мартынов, 2019). В данной работе будем опираться на значения критериев обеспеченности и ОДК, принятые в России.

Содержание подвижных форм тяжелых металлов в почвах поймы р. Десны варьирует в широких пределах (табл. 4). На отдельных участках оно превышает установленные гигиенические нормативы для свинца и хрома, что не является характерным для аллювиальных почв региона, но возникает при антропогенном воздействии.

При этом доля подвижных форм элементов от валового количества также изменяется в широких пределах и составляет следующие медианные значения: кадмий – 4.29–99.68% (CV = 35.41%); свинец – 0.53–90.88% (CV = 107.92%); цинк – 0.00–87.41% (CV = 139.7%); медь – 0.14–19.11% (CV = 101.57%); никель – 1.49–88.37% (CV = 91.28%); кобальт – 0.04–70.72% (CV = 175.01%); хром – 0.00–87.13% (CV = 234.66%). По степени подвижности рассматриваемые элементы можно расположить в следующий убывающий ряд: Cd (59.48%) > Ni (6.55%) > Pb (5.63%) > Zn (3.91%) > Cu (1.60%) > Co (1.56%) > Cr (1.19%).

В скобках приведены медианные значения доли подвижной формы от валовой. Аналогичные ряды получены другими авторами (Просянкин, 2012; Система агроэкологического мониторинга..., 2006).

**Таблица 4.** Содержание подвижных форм тяжелых металлов (мг/кг) в почвах поймы р. Десны  
**Table 4.** The content of mobile forms of heavy metals (mg/kg) in the soils of the Desna River floodplain

Показатель	Cd	Pb	Zn	Cu	Ni	Co	Cr
Среднее	0.073	0.82	1.59	0.58	0.73	0.11	0.86
Медиана	0.048	0.55	1.16	0.57	0.62	0.04	0.57
Экссесс	11.715	147.18	22.82	3.35	1.16	14.39	12.92
Асимметричность	2.737	11.21	4.37	1.16	1.19	3.38	3.07
Минимум	0.003	0.05	0.000	0.029	0.086	0.002	0.000
Максимум	0.559	20.65	14.82	2.42	2.22	1.15	6.80
Вариация, %	96.52	182.18	129.82	61.80	61.44	154.16	111.73
ОДК	–	6.00	23.00	3.00	4.00	5.00	6.00

Высокая доля подвижных соединений может быть связана с высоким содержанием органического вещества, высокой кислотностью среды, легким гранулометрическим составом и другими причинами (Московченко, Бабушкин, 2015).

С целью определения зависимости содержания подвижной формы тяжелых металлов от гранулометрического состава почв был проведен корреляционный анализ (рис. 4). Значимая положительная корреляция с фракциями <0.01 мм отмечена для кадмия, меди, никеля и кобальта. Для свинца значимой корреляции с гранулометрическим составом не установлено. Для цинка значимая положительная корреляция отмечена с фракциями 0.001–0.005 и 0.005–0.01 мм; для хрома – с фракцией 0.005–0.01 мм. Полученные данные частично согласуются с данными других исследователей. В частности, В.М. Красницкий с соавторами отмечают для почв водоразделов наличие корреляционной связи гранулометрического состава почвы с содержанием подвижных форм свинца (Красницкий и др., 2015).

Агрохимическая группировка подвижной формы рассматриваемых элементов по содержанию в почве дана по методическим рекомендациям (Методические указания..., 2003). Предусмотрено выделение групп почв по степени обеспеченности для цинка, меди и кобальта (табл. 5).

**Таблица 5.** Группировка почв по содержанию подвижных форм элементов в вытяжке ацетат-аммонийного буфера (pH = 4.8)

**Table 5.** Grouping of soils by the content of mobile forms of elements in the extract of ammonium acetate buffer (pH = 4.8)

Элемент	Градация почв по содержанию элементов, мг/кг		
	низкое	среднее	высокое
Цинк	<2.00	2.10–5.00	>5.00
Медь	<0.20	0.21–0.50	>0.50
Кобальт	<0.15	0.16–0.30	>0.30

По содержанию подвижных форм элементов рассматриваемые почвы варьируют от уровня низкой до уровня высокой обес-

печенности, однако медианные значения для цинка и кобальта относятся к категории “низкое”, а для меди – “высокое”. Исходя из этого при ведении сельского хозяйства на данных почвах необходимо учитывать уровень обеспеченности почв указанными элементами, при необходимости добавляя их в питание растений.

## ВЫВОДЫ

1. Определено содержание валового количества и подвижных форм кадмия, свинца, цинка, меди, никеля, кобальта и хрома в аллювиальных почвах р. Десны. Показана его высокая вариация.

2. Установлено наличие корреляционной связи между валовым содержанием тяжелых металлов в почве и ее гранулометрическим составом.

3. По величине кларка концентрации элементы сгруппированы в убывающий ряд:  $Cu > Pb > Zn > Co > Ni > Cr > Cd$ , аналогичный для аллювиальных почв других рек региона.

4. Составлен геохимический индекс пойменных почв р. Десны, который позволяет судить о потенциальном запасе тяжелых металлов.

5. Установлен ряд подвижности тяжелых металлов:  $Cd > Ni > Pb > Zn > Cu > Co > Cr$ , аналогичный почвам другого генезиса.

6. Установлено наличие корреляционной связи между содержанием подвижных форм кадмия, меди, никеля и кобальта и содержанием физической глины в почве.

7. Показана степень обеспеченности пойменных почв р. Десны цинком, медью и кобальтом. Отмечена необходимость в дополнительном их внесении при выращивании сельскохозяйственной продукции.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кораблева Л.И.* Плодородие, агрохимические свойства и удобрение пойменных почв Нечерноземной зоны. М.: Наука, 1969. 277 с.
2. *Красницкий В.М., Шмидт А.Г., Матвейчик О.А.* Агроэкологическая характеристика пахотных почв Омской области // Плодородие. 2018. № 5 (104). С. 42–46.
3. *Красницкий В.М., Шмидт А.Г., Цырк А.А.* Содержание свинца в почвах Омской области // Плодородие. 2015. № 3 (84). С. 43–45.

4. *Кудашкин М.И.* Медь и эффективность медьсодержащих удобрений в дерново-подзолистых и пойменных почвах // *Агрохимия*. 2003. № 7. С. 11–18.
5. *Мартынов А.В.* Содержание и распределение биофильных микроэлементов в аллювиальных почвах пойм крупных рек Зейско-Селемджинской равнины // *Фундаментальные исследования*. 2014. № 6–4. С. 771–775.
6. *Мартынов А.В.* Содержание подвижных форм микроэлементов в аллювиальных почвах поймы среднего течения р. Амур и влияние на них паводка 2013 года // *Вестник Воронежского государственного университета*. Серия: География. Геоэкология. 2019. № 2. С. 32–39.
7. Методические указания по проведению комплексного мониторинга плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения / *В.Г. Сычев, А.Н. Аристархов, И.В. Володарская* и др. М.: Российский научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса, 2003. 240 с.
8. *Московченко Д.В., Бабушкин А.Г.* Фоновое содержание подвижных форм металлов в почвах Севера Западной Сибири // *Вестник Тюменского государственного университета*. Экология и природопользование. 2015. Т. 1. № 3. С. 163–174.
9. *Балабко П.Н., Снег А.А., Локалина Т.В., Щедрин В.Н.* Почвы мелиорированной поймы верхнего течения реки Оки, используемые в интенсивном земледелии // *Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации*. 2016. № 3 (23). С. 116–137.
10. *Просьянников В.И.* Подвижность микроэлементов в пахотных почвах // *Агрохимический вестник*. 2012. № 4. С. 36–37.
11. *Протасова Н.А., Щербаков А.П.* Особенности формирования микроэлементного состава зональных почв Центрального Черноземья // *Почвоведение*. 2004. № 1. С. 50–59.
12. *Прохорова Н.В.* Ландшафтный подход в региональных эколого-геохимических исследованиях // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2004. Т. 6. № 2. С. 259–265.
13. *Рыбашлыкова Л.П., Конев С.В.* Эколого-геохимическое состояние луго-пастбищных экосистем Волго-Ахтубинской поймы // *Юг России: экология, развитие*. 2017. Т. 12. № 4. С. 185–191.
14. *Самсонова В.П., Мешалкина Ю.Л.* Часто встречающиеся неточности и ошибки применения статистических методов в почвоведении // *Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева*. 2020. Вып. 102. С. 164–182. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-102-164-182>.
15. *Орешкин В.Н., Ульяночкина Т.И., Кузьменкова В.С., Балабко П.Н.*

Свинец в марганцовисто-железистых конкрециях различного размера из аллювиальных почв и отложений // Геохимия. 2000. Т. 38. № 6. С. 680–684.

16. Сычев В.Г., Ефремов Е.Н., Лунев М.И., Кузнецов А.В. Система агроэкологического мониторинга земель сельскохозяйственного назначения. М., 2006. 79 с.

17. Просянкин Д.Е., Балабко П.Н., Просянкин Е.В., Чекин Г.В. Современное состояние экосистемы правобережной поймы Средней Десны и перспективы ее рационального использования // Агрохимический вестник. 2012. № 5. С. 9–13.

18. Чекин Г.В., Силаев А.Л., Смольский Е.В. Распределение Cu, Ni, Zn, Mn, Cr, Cd, Pb, Co, Mo, As в аллювиальных почвах пойменных ландшафтов бассейна реки Сож // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2021. Вып. 109. С. 165–185. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2021-109-165-185>.

19. Чекин Г.В., Смольский Е.В. Агрохимические свойства почв и поведение химических элементов в системе почва-растение в пойме р. Десна // Проблемы агрохимии и экологии. 2024. № 1. С. 36–44. DOI: <https://doi.org/10.26178/3691.2024.25.18.002>.

20. Шиманская А.А., Позняк С.С. Профильное распределение меди, цинка и свинца в пойменных почвах мозырского полесья // Экологический вестник. 2016. № 1. С. 118–123.

21. Du Laing G., Rinklebe J., Vandecasteele B., Meers E., Tack F.M.G. Trace metal behaviour in estuarine and riverine floodplain soils and sediments: A review // Science of the Total Environment. 2009. Vol. 407. P. 3972–3985.

22. Hooda P. Trace Elements in Soils. First ed. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2010. 596 p.

23. Izquierdo M., Tye A.M., Chenery S.R. Lability, solubility and speciation of Cd, Pb and Zn in alluvial soils of the River Trent catchment // UK Environmental science. Processes & impacts. 2013. Vol. 15. No. 10. P. 1844–1858. DOI: <https://doi.org/10.1039/C3EM00370A>.

24. Kalmykow-Piwińska A., Falkowska E. Morphodynamic conditions of heavy metal concentration in deposits of the Vistula River valley near Kępa Gostecka (central Poland) // Open Geosciences. 2020. Vol. 12. No. 1. P. 1036–1051.

25. Matys Grygar T., Elznicová J., Kiss T., Smith H.G. Using sedimentary archives to reconstruct pollution history and sediment provenance // Catena. 2016. No. 144. P. 109–129.

26. McComb J.Q., Han F.X., Rogers C., Thomas C., Arslan Z., Ardeshir A., Tchounwou P.B. Trace elements and heavy metals in the Grand Bay National Estuarine Reserve in the northern Gulf of Mexico // Mar Pollut Bull. 2015.

Vol. 99 (1–2). P. 61–69. DOI:  
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.07.062>.

27. Sabry M. Shaheen, Jörg Rinklebe. Geochemical fractions of chromium, copper, and zinc and their vertical distribution in floodplain soil profiles along the Central Elbe River, Germany // *Geoderma*. 2014. Vol. 228–229. P. 142–159.

## REFERENCES

1. Korableva L.I., *Plodorodie, agrokhimicheskie svoistva i udobrenie poimennykh pochv Nechernozemnoi zony* (Fertility, agrochemical properties and fertilization of floodplain soils of the Non-Chernozem zone), Moscow: Nauka, 1969, 277 p.
2. Krasnitskii V.M., Shmidt A.G., Matveichik O.A., *Agroekologicheskaya kharakteristika pakhotnykh pochv Omskoi oblasti* (Agroecological characteristics of arable soils of the Omsk region), *Plodorodie*, 2018, No. 5 (104), pp. 42–46.
3. Krasnitskii V.M., Shmidt A.G., Tsyryk A.A., *Soderzhanie svintsy v pochvakh Omskoi oblasti* (Copper and the efficiency of copper-containing fertilizers in sod-podzolic and floodplain soils), *Plodorodie*, 2015, No. 3 (84), pp. 43–45.
4. Kudashkin M.I., *Med' i effektivnost' med'soderzhashchikh udobrenii v dernovo-podzolistykh i poimennykh pochvakh* (Lead content in soils of the Omsk region), *Agrokhiimiya*, 2003, No. 7, pp. 11–18.
5. Martynov A.V., *Soderzhanie i raspredelenie biofil'nykh mikroelementov v allyuvial'nykh pochvakh poim krupnykh rek Zeisko-Selemdzhinskoi ravniny* (Content and distribution of biophilic microelements in alluvial soils of the floodplains of large rivers of the Zeya-Selemdzhinskaya plain), *Fundamental'nye issledovaniya*, 2014, No. 6–4, pp. 771–775.
6. Martynov A.V., *Soderzhanie podvizhnykh form mikroelementov v allyuvial'nykh pochvakh poimy srednego techeniya r. Amur i vliyanie na nikh pavodka 2013 goda* (Content of mobile forms of microelements in alluvial soils of the floodplain of the middle reaches of the Amur River and the impact of the 2013 flood on them), *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta*, Seriya: Geografiya. Geoekologiya, 2019, No. 2, pp. 32–39.
7. Sychev V.G., Aristarkhov A.N., Volodarskaya I.V., *Metodicheskie ukazaniya po provedeniyu kompleksnogo monitoringa plodorodiya pochv zemel' sel'skokhozyaistvennogo naznacheniya* (Methodological guidelines for conducting comprehensive monitoring of soil fertility of agricultural lands), Moscow: Rossiiskii nauchno-issledovatel'skii institut informatsii i tekhniko-

ekonomicheskikh issledovaniy po inzhenerno-tekhnicheskomu obespecheniyu agropromyshlennogo kompleksa, 2003, 240 p.

8. Moskovchenko D.V., Babushkin A.G., Fonovoe sodержanie podvizhnykh form metallov v pochvakh Seve-ra Zapadnoi Sibiri (Background Content of Mobile Forms of Metals in Soils of the North of Western Siberia), *Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta. Ekologiya i prirodopol'zovanie*, 2015, Vol. 1, No. 3, pp. 163–174.

9. Balabko P.N., Sneg A.A., Lokalina T.V., Shchedrin V.N., Pochvy meliorovannoi poimy verkhnego techeniya reki Oki, ispol'zuemye v intensivnom zemledelii (Soils of the reclaimed floodplain of the upper reaches of the Oka River used in intensive farming), *Nauchnyi zhurnal Rossiiskogo NII problem melioratsii*, 2016, No. 3 (23), pp. 116–137.

10. Prosyannikov V.I., Podvizhnost' mikroelementov v pakhotnykh pochvakh (Microelement mobility in arable soils), *Agrokhimicheskii vestnik*, 2012, No. 4, pp. 36–37.

11. Protasova N.A., Shcherbakov A.P., Osobennosti formirovaniya mikroelementnogo sostava zonal'nykh pochv Tsentral'nogo Chernozem'ya (Features of the formation of the microelement composition of zonal soils of the Central Chernozem region), *Pochvovedenie*, 2004, No. 1, pp. 50–59.

12. Prokhorova N.V., Landshaftnyi podkhod v regional'nykh ekologo-geokhimicheskikh is-sledovaniyakh (Landscape approach in regional ecological-geochemical studies), *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*, 2004, Vol. 6, No. 2, pp. 259–265.

13. Rybashlykova L.P., Konev S.V., Ekologo-geokhimicheskoe sostoyanie lugo-pastbishchnykh ekosistem Volgo-Akhtubinskoi poimy (Ecological and geochemical state of meadow-pasture ecosystems of the Volga-Akhtuba floodplain), *Yug Rossii: ekolo-giya, razvitie*, 2017, Vol. 12, No. 4, pp. 185–191.

14. Samsonova V.P., Meshalkina J.L., Common inaccuracies and errors in the application of statistical methods in soil science, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2020, Vol. 102, pp. 164–182, DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-102-164-182>.

15. Oreshkin V.N., Ulyanochkina T.I., Kuzmenkova V.S., Balabko P.N., Svinets v margantsovisto-zhelezistykh konkretyyakh razlichnogo razmera iz allyuvi-al'nykh pochv i otlozhenii (Lead in manganese-ferrous concretions of various sizes from alluvial soils and sediments), *Geokhimiya*, 2000, Vol. 38, No. 6, pp. 680–684.

16. Sychev V.G., Efremov E.N., Lunev M.I., Kuznetsov A.V., *Sistema agroekologicheskogo monitoringa zemel' sel'skokhozyaistvennogo naznacheniya* (Agroecological monitoring system for agricultural lands), Moscow, 2006, 79 p.

17. Prosyannikov D.E., Balabko P.N., Prosyannikov E.V., Chekin G.V., *Sovremennoe sostoyanie ekosistemy pravoberezhnoi poimy Srednei Desny i perspektivy ee ratsional'nogo ispol'zovaniya* (Current state of the ecosystem of the right-bank floodplain of the Middle Desna and prospects for its rational use), *Agrokhimicheskii vestnik*, 2012, No. 5, pp. 9–13.
18. Chekin G.V., Silaev A.L., Smolsky E.V., Distribution of Cu, Ni, Zn, Mn, Cr, Cd, Pb, Co, Mo, As in alluvial soils of floodplain landscapes of the Sozh river basin, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2021, Vol. 109, pp. 165–185. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2021-109-165-185>.
19. Chekin G.V., Smol'skii E.V., *Agrokhimicheskie svoystva pochv i povedenie khimicheskikh elementov v sisteme pochva-rastenie v poime r. Desna* (Agrochemical properties of soils and the behavior of chemical elements in the soil-plant system in the Desna River floodplain), *Problemy agrokhimii i ekologii*, 2024, No. 1, pp. 36–44, DOI: <https://doi.org/10.26178/3691.2024.25.18.002>.
20. Shimanskaya A.A., Poznyak S.S., *Profil'noe raspredelenie medi, tsinka i svintsya v poimennykh pochvakh mozyrskogo poles'ya* (Profile distribution of copper, zinc and lead in floodplain soils of the Mozyr Polesie), *Ekologicheskii vestnik*, 2016, No. 1, pp. 118–123.
21. Du Laing G., Rinklebe J., Vandecasteele B., Meers E., Tack F.M.G., Trace metal behaviour in estuarine and riverine floodplain soils and sediments: A review, *Science of the Total Environment*, 2009, Vol. 407, pp. 3972–3985.
22. Hooda P., *Trace Elements in Soils*. First ed., Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2010, 596 p.
23. Izquierdo M., Tye A.M., Chenery S.R., Lability, solubility and speciation of Cd, Pb and Zn in alluvial soils of the River Trent catchment, *UK Environmental science. Processes & impacts*, 2013, Vol. 15, No. 10, pp. 1844–1858, DOI: <https://doi.org/10.1039/C3EM00370A>.
24. Kałmykow-Piwińska A., Falkowska E., Morphodynamic conditions of heavy metal concentration in deposits of the Vistula River valley near Kępa Gostecka (central Poland), *Open Geosciences*, 2020, Vol. 12, No. 1, pp. 1036–1051.
25. Matys Grygar T., Elznicová J., Kiss T., Smith H.G., Using sedimentary archives to reconstruct pollution history and sediment provenance, *Catena*, 2016, No. 144, pp. 109–129.
26. McComb J.Q., Han F.X., Rogers C., Thomas C., Arslan Z., Ardeshir A., Tchounwou P.B., Trace elements and heavy metals in the Grand Bay National Estuarine Reserve in the northern Gulf of Mexico, *Mar Pollut Bull.*, 2015, Vol. 99 (1–2), pp. 61–69, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.07.062>.

27. Shaheen S.M., Rinklebe J., Geochemical fractions of chromium, copper, and zinc and their vertical distribution in floodplain soil profiles along the Central Elbe River, Germany, *Geoderma*, 2014, Vol. 228–229, pp. 142–159.

Научное издание

Бюллетень Почвенного института  
имени В.В. Докучаева

Выпуск 127

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 25.03.2026 г.  
Подписано в печать 25.03.2026 г.  
Формат 60×84/16. Бумага офсетная.  
Усл. печ. л. 15,6 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-rpa@list.ru](mailto:apr-rpa@list.ru)