

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

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

БЮЛЛЕТЕНЬ

ПОЧВЕННОГО ИНСТИТУТА

имени В.В. ДОКУЧАЕВА

Выпуск 129

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 129

**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 Висконсин-на, 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

СТАТЬИ

Подземная распределенная сеть мониторинга состояния почвы <i>Иванов А.Л., Болотов А.Г., Филь П.П., Баматов И.М.</i>	5
Модель баланса гумуса для продвижения рапса в регенеративное земледелие и низкоуглеродную экономику Российской Федерации <i>Столбовой В.С., Гребенников А.М.</i>	27
Томография почв: методические рекомендации и требования к подготовке и съемке монолитов и микромонолитов <i>Абросимов К.Н.</i>	43
Микробиом почв различных ампелоценозов <i>Кондратюк Н.В., Астапчук И.Л., Гладченко Д.Н., Кузнецова Н.А., Смолич О.С., Ребух Н.Я.</i>	84
Иттрий в почвах и растениях Восточного Забайкалья <i>Макаров В.П., Юргенсон Г.А.</i>	111
Химические свойства и биологическая активность почв с включенным культурным слоем в условиях средней тайги Восточно-Европейской равнины <i>Вахрушев Л.А., Карманов В.Н., Борисов А.В., Недомолкина Н.Г., Дымов А.А.</i>	136
Изменение свойств почв при различных формах и степени проявления опустынивания <i>Федотова А.В., Тимофеев Е.П.</i>	170
Варьирование оценок эрозии почв при использовании разных карт землепользования Тульской области <i>Хирк А.В., Жидкин А.П.</i>	191

ДИСКУССИЯ

Методология оценки вклада почв в экосистемные сервисы <i>Савин И.Ю., Соловьев Д.А., Орлова К.С., Сапожников П.М., Романовская А.Ю.</i>	216
---	-----

ПОЧВЕННАЯ ЭКСПЕРТИЗА

Оптимизация понятийного аппарата в судебно-экологической экспертизе <i>Дабахов М.В., Дабахова М.В.</i>	239
---	-----

CONTENTS

ARTICLES

Underground distributed IoT soil monitoring network <i>Ivanov A.L., Bolotov A.G., Fil P.P., Bamatov I.M.</i>	5
A humus balance model for promoting rapeseed in regenerative agriculture and a low-carbon economy in the Russian Federation <i>Stolbovoy V.S., Grebennikov A.M.</i>	27
Soil tomography: methodological recommendations and requirements for preparation and surveying of monoliths and micromonoliths <i>Abrosimov K.N.</i>	43
Microbiome of ampelocenoses of various soil types <i>Kondratyuk N.V., Astapchuk I.L., Gladchenko D.N., Kuznetsova N.A., Smolich O.S., Rebouh N.Y.</i>	84
Yttrium in soils and plants of Eastern Transbaikalia <i>Makarov V.P., Yurgenson G.A.</i>	111
Chemical properties and biological activity of soils with an incorporated cultural layer in the conditions of the middle taiga of the East European Plain <i>Vakhrushev L.A., Karmanov V.N., Borisov A.V., Nedomolkina N.G., Dymov A.A.</i>	136
Changing the properties of soils in various forms and degree of manifestation of desertification <i>Fedotova A.V., Timofeev E.P.</i>	170
Variation in soil erosion estimates using different land use maps in the Tula Region <i>Khirk A.V., Zhidkin A.P.</i>	191

DISCUSSION

Methodology for assessing the soil contribution to ecosystem services <i>Savin I.Yu., Soloviev D.A., Orlova K.S., Sapozhnikov P.M., Romanovskaya A.Yu.</i>	216
---	-----

SOIL EXPERTISE

Optimization of the conceptual framework in forensic environmental expertise <i>Dabakhov M.V., Dabakhova E.V.</i>	239
--	-----

===== **СТАТЬИ** =====

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2026-129-5-26



Ссылки для цитирования:

Иванов А.Л., Болотов А.Г., Филь П.П., Баматов И.М. Подземная распределенная сеть мониторинга состояния почвы // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2026. Вып. 129. С. 5-26. DOI: 10.19047/0136-1694-2026-129-5-26

Cite this article as:

Ivanov A.L., Bolotov A.G., Fil P.P., Bamatov I.M., Underground distributed IoT soil monitoring network, Dokuchaev Soil Bulletin, 2026, V. 129, pp. 5-26, DOI: 10.19047/0136-1694-2026-129-5-26

Благодарность.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-15-2024-545 от 24.04.2024 г.).

Вклад авторов. А.Л. Иванов – концептуализация; А.Г. Болотов – концептуализация, написание текста; П.П. Филь – концептуализация, методология, проведение исследования, написание текста; И.М. Баматов – проведение исследования.

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

Заявление об использовании технологий искусственного интеллекта. При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовались.

Заявление о доступности данных.

Все данные, полученные в ходе этого исследования, включены в опубликованную статью.

Acknowledgments.

The work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Agreement No. 075-15-2024-545 dated April 24, 2024).

Authors' contributions. A.L. Ivanov – conceptualization; A.G. Bolotov – conceptualization, writing; P.P. Fil – conceptualization, methodology, investigation, writing; I.M. Bamatov – investigation.

Conflicts of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Statement on the use of artificial intelligence technologies.

No generative artificial intelligence technologies were used in the creation of this article.

Data availability.

All data obtained during this study are included in the published article.

Подземная распределенная сеть мониторинга состояния почвы

© 2026 г. А. Л. Иванов¹, А. Г. Болотов^{1*}, П. П. Филь^{1**},
И. М. Баматов²

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

*<https://orcid.org/0000-0002-8264-3266>,

**<https://orcid.org/0000-0002-9851-5381>, e-mail: philpaulp@esoil.ru.

²Всероссийский научно-исследовательский институт мелиорированных
земель – филиал Почвенного института им. В.В. Докучаева, Россия,
170530, Тверская обл., п. Эммаусс, 27.

Поступила в редакцию 02.12.2025, после доработки 28.05.2026,
принята к публикации 21.08.2026

Резюме: В работе рассматривается возможность использования технологии узкополосной фазоманипулирующей связи для реализации системы мониторинга подповерхностных слоев почв. Полевые испытания проведены в 2024 г. на агрополигоне ВНИИМЗ (Тверская область) на дерново-подзолистых среднесуглинистых почвах. Три радиомодема NB-Fi BT100 последовательно размещались в девяти точках на расстояниях порядка 300–1300 м от базовой станции и заглублялись на 20 и 40 см, имитируя работу узлов подземной сети. Телеметрические данные передавались один раз в сутки, качество радиоканала оценивалось по значениям отношения сигнала/шум и мощности принимаемого сигнала (SNR и RSSI). Выявлено, что при установке радиомодемов на глубине 20–40 см устойчивый прием информационных пакетов на наземной базовой станции сохраняется во всем диапазоне расстояний, а значения SNR (~5–25 дБ, с максимумами до 30–33 дБ) и RSSI (от -90 до -140 дБм) остаются выше порогов чувствительности приемника. Таким образом, эксперимент продемонстрировал, что рассматриваемая технология может быть использована в качестве подземного канала связи при создании

распределенных систем мониторинга состояния подповерхностных слоев почв без вывода антенн на поверхность.

Ключевые слова: подземные сенсорные сети; мониторинг почв; агроландшафты; беспроводные сети датчиков.

Underground distributed IoT soil monitoring network

© 2026 A. L. Ivanov¹, A. G. Bolotov^{1*}, P. P. Fil^{1**},
I. M. Bamatov²

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

^{}<https://orcid.org/0000-0002-8264-3266>,*

*^{**}<https://orcid.org/0000-0002-9851-5381>, e-mail: philpaulp@esoil.ru.*

²*All-Russian Research Institute of Reclaimed Lands –
V.V. Dokuchaev Soil Science Institute affiliation,
27 Emmaus, Tver Region 170530, Russian Federation.*

Received 02.12.2025, Revised 28.05.2026, Accepted 21.08.2026

Abstract: This paper examines the feasibility of using a narrowband phase-shift keying (PSK) communication technology to implement a subsurface soil monitoring system. Field trials were carried out in 2024 at the VNIIMZ agro-experimental site (Tver Oblast, Russia) on loamy sod-podzolic soils. Three NB-Fi BT100 radio modems were deployed sequentially at nine locations at distances of about 300–1300 m from the base station and buried at depths of 20 and 40 cm to emulate underground network nodes. Telemetry data were transmitted once per day, and the radio link quality was evaluated using the signal-to-noise ratio (SNR) and the received signal strength indicator (RSSI). It was found that when the radio modems were installed at depths of 20–40 cm, stable reception of data packets was maintained over the entire range of distances, while SNR values (~5–25 dB, with maxima up to 30–33 dB) and RSSI values (from –90 to –140 dBm) remained above the receiver sensitivity thresholds. Thus, the experiment demonstrates that the considered technology can be used as a subsurface communication channel for distributed soil monitoring systems without bringing antennas to the surface.

Keywords: underground sensor networks; soil monitoring; agricultural landscapes; wireless sensor networks.

ВВЕДЕНИЕ

Усиление изменчивости климата сопровождается не только ростом средних температур, но и увеличением внутрисезонной и межгодовой изменчивости осадков, частоты засух, паводков и других экстремальных событий. Современные оценки и модельные расчеты показывают, что во многих аграрных регионах мира ожидается не только однозначное изменение, но и рост контрастности водного режима почв: учащение периодов дефицита влаги и экстремальных почвенных засух, с одной стороны, и эпизодов переувлажнения и застойного увлажнения (в том числе весеннего) – с другой (Hersbach et al., 2020; Национальный доклад, 2018). Для землепользователей это означает снижение надежности долгосрочного планирования, основанного на усредненных климатических показателях. В данных условиях возрастает роль оперативного мониторинга состояния почвенно-растительной системы и развития наряду с долгосрочным стратегическим планированием, более ситуационного, краткосрочного, адаптивного управления агротехнологиями, опирающегося на технологии цифровых двойников почв агроэкосистем.

На этом фоне автоматизированные системы регулярного сбора и передачи данных становятся ключевым элементом как фундаментальных исследований почв – изучения их генезиса, функционирования, гидрологических и биогеохимических процессов, так и прикладных задач: оптимизации агротехнологий и оперативной поддержки хозяйственных решений (Zhang et al., 2024; Finke, 2012). Уже сегодня современные автоматизированные технологии мониторинга позволяют получать непрерывные измерения состояния почвы, что дает возможность исследователям сосредотачиваться на анализе данных, а не на их ручном сборе, и своевременно реагировать на изменения внешних условий.

При этом традиционные автоматизированные системы мониторинга почв в сельском хозяйстве на основе сетей GSM, Bluetooth, ZigBee, LoRa, Wi-Fi имеют существенные ограничения. Наиболее критичным из них является необходимость размещения антенн и источников энергии над поверхностью почвы (Da Silva et al., 2013; Cariou et al., 2023; Национальный доклад, 2021). В усло-

виях работы сельскохозяйственной техники это часто приводит к повреждению оборудования, вынужденному размещению точек мониторинга лишь на границах полей, а также нарушению условий эксперимента, когда технике приходится объезжать датчики. Эти проблемы особенно проявляются на тех участках, где требуется высокая пространственная детализация измерений, например, при пространственном изучении водного режима.

Технологии подземного интернета вещей (Internet of Underground Things, IoUT) представляют собой альтернативный подход, позволяющий полностью погружать устройства под землю без вывода антенн, солнечных панелей и кабельных соединений на поверхность (Vuran et al., 2018; Филь и др., 2024). Такие подземные системы менее подвержены повреждениям и могут размещаться в любой точке поля, решая ключевую проблему передачи сигнала сквозь почву.

Одной из технологий, потенциально способной обеспечить связь в подземной среде, является протокол NB-Fi (Narrowband Fidelity). Стандарт NB-Fi использует узкополосную фазовую модуляцию сигнала с высокой дискретностью изменения частот и помехоустойчивым кодированием сигнала, обеспечивая высокую чувствительность приема до -150 дБм и высокую потенциальную проникаемость сигнала.

Гипотеза исследования заключалась в том, что благодаря особенностям передачи и декодирования сигнал NB-Fi способен проникать через экранирующую среду – почву. Для ее проверки был проведен эксперимент по передаче сигнала из-под поверхности почвы с использованием NB-Fi-логгеров. Целью исследования являлось определение способности узкополосной фазоманипулирующей технологии передачи данных обеспечивать устойчивый канал связи *in situ* и выявление факторов (глубина установки, расстояние до базы), которые наиболее существенно влияют на успешность доставки информационных пакетов.

IOUT: ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ

Подземные IoUT-системы изначально активно развивались в горной промышленности и подземной городской инфраструктуре и лишь затем были адаптированы для задач сельского хозяйства.

Эти технологии используются для мониторинга вентиляционных шахт глубоких и сверхглубоких рудников (Pathegama et al., 2017; Anvari, Benndorf, 2025), для мониторинга угольных шахт (Li, Liu, 2009). IoUT устройства применяются для контроля параметров городских подземных вентиляционных систем (температуры, влажности, давления воздуха) (Santos et al., 2022), комплексные IoUT-решения – для экологического и производственного мониторинга в подземных выработках (Zhang et al., 2023). Во многих случаях реализуются системы на базе ZigBee/Sigfox/Lora и других промышленных беспроводных сетей, интегрированных с ГИС (We et al., 2011; Moridi et al., 2015). Одновременно развивается направление подземных параллельных вычислений: предварительная фильтрация и анализ данных выполняются на локальных шлюзах, что снижает нагрузку на каналы связи с облаком и уменьшает задержки обратного отклика (Wu et al., 2019; Bing et al., 2023; Liu et al., 2021). Фундаментальные ограничения подземного канала связи (затухание, зависимость от свойств среды, энергетические ограничения) являются общими для разных хозяйственных отраслей, тогда как сельскохозяйственные WUSN/IoUT добавляют к ним свою специфику.

Существующие решения для подземной беспроводной связи можно условно разделить на несколько классов в зависимости от физического принципа передачи сигнала. Наиболее разработаны системы на базе электромагнитных (ЭМ) волн с дипольными или монопольными антеннами. Для них детально описано поведение канала связи “почва–почва” и “почва–воздух” с учетом диэлектрической проницаемости, проводимости и объемной влажности почвы (Vuran, Akyildiz, 2010; Sadeghioon et al., 2017; Huang et al., 2020). Полевые эксперименты показывают, что затухание ЭМ-сигнала в почве в диапазоне от сотен мегагерц до нескольких гигагерц на порядок выше, чем в воздухе, и резко возрастает с увеличением глубины, содержания воды и солей. Поэтому устойчивая связь достигается либо на очень малых глубинах (10–30 см), либо при использовании сильно пониженных частот и малых дистанций между узлами сети.

На этой основе развиваются решения на базе LoRa/LoRaWAN. В работе (Hardie, Hoyle, 2019) показано, что при

использовании 433 МГц LoRa в почвах устойчивый прием возможен при заглублении радиомодемов до 10–20 см в относительно сухих условиях; при увеличении влажности или глубины связь быстро теряется. L. Moiroux-Arvis и соавторы (Moiroux-Arvis et al., 2022) количественно сравнили проникаемость сигнала на частотах 433 и 868 МГц в сценарии “подземный радиомодем – наземный приемник” и показали, что на частоте 433 МГц запас по уровню сигнала и дальности существенно выше, но и он остается сильно ограниченным при увеличении влажности выше 50% полной влагоемкости и утяжелении гранулометрического состава почвы. Похожие выводы получены для LoRa-сетей в почвах при мониторинге земляных плотин (Liang et al., 2023). Тем не менее, LoRa-решения для подземных систем мониторинга остаются компромиссом: они используют зрелую массовую технологию LPWAN, но рассчитаны прежде всего на надземный канал, и их сигнал быстро затухает в почве.

Проведенное Р. Levchenko и соавторами сравнение NB-Fi с другими массовыми LPWAN-технологиями (LoRaWAN, Sigfox) показало, что при сопоставимых частотно-энергетических ресурсах NB-Fi особенно эффективен в сценариях передачи небольших объемов данных, характерных для телеметрии, например, разовых сообщений о значениях влажности почвы (Levchenko et al., 2022). В таких условиях NB-Fi сигнал имеет более низкую вероятность потерь пакетов по сравнению с альтернативными решениями. При этом NB-Fi изначально разрабатывался для “классических” IoT-задач – учета энергоресурсов, ЖКХ, мониторинга городской инфраструктуры и окружающей среды (Bankov et al., 2022; ГОСТ Р 70036-2022, 2022; WAVIoT, 2025), то есть для надземных условий с относительно благоприятным радиоканалом.

Несмотря на быстрое развитие NB-Fi как национального стандарта в Российской Федерации и накопление данных по городским и промышленным IoT-сценариям, работ, посвященных применению NB-Fi для мониторинга почв, пока нет. В доступной литературе не рассматриваются особенности распространения NB-Fi-сигнала в почве и в системе “почва–воздух”. В этой связи в настоящей работе ставится задача оценки возможности применения технологии NB-Fi при размещении логгеров под поверхно-

стью почвы и рассмотрения возможности доставки данных на сервер без вывода антенн на дневную поверхность.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Полевые исследования проводились в 2024 г. на опытном участке ФГБНУ “Всероссийский НИИ мелиорированных земель” (ВНИИМЗ), расположенном в Калининском районе Тверской области, в окрестностях поселка Эммаусс. Территория полигона находится в южнотаежной подзоне хвойно-широколиственных лесов. В физико-географическом отношении участок приурочен к Верхневолжской низменности, представляющей собой озерно-водноледниковую равнину, осложненную моренными грядами (рис. 1). Агроклиматические условия полигона характеризуются умеренно влажным климатом с избыточным или близким к избыточному увлажнению. По данным ближайшей метеостанции “Тверь” среднегодовое количество атмосферных осадков составляет порядка 650–700 мм, низкая теплообеспеченность определяет формирование дерново-подзолистых почв. Значительная часть территории осушена закрытым дренажем глубиной около 1 м с расстоянием между дренами 20–40 м.

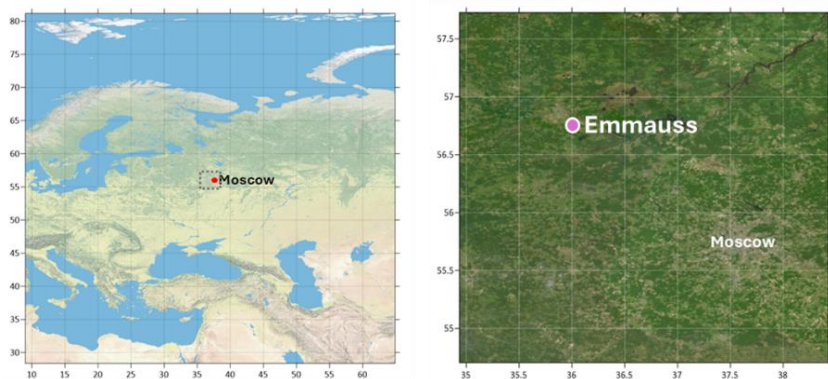


Рис. 1. Расположение участка проведения эксперимента.

Fig. 1. Location of the experimental site.

Рельеф опытного поля слабоволнистый, центральная, более приподнятая, часть участка приурочена к моренной гряде с абсолютными отметками до ~165 м н. у. м. и сложена суглинистой мореной с тонкой покровной толщей более легких отложений. Мощность песчано-супесчаной толщи существенно варьирует (от 10–20 см до 2–3 м) (Шеин и др., 2023).

В задачи эксперимента входило количественно оценить показатели качества радиосвязи тестовых модемов NB-Fi – отношение сигнал/шум SNR (Signal-to-Noise Ratio) и индикатор мощности принимаемого сигнала RSSI (Received Signal Strength Indicator) в зависимости от расстояния до базовой станции и глубины их заложения в почву. Всего в эксперименте использовались три подземных радиомодема NB-Fi BT100 (WAVIoT) с заданными идентификаторами. В период с 24 мая по 28 июня 2024 г. они попеременно переставлялись каждые 5–8 дней между заранее выбранными точками, расположенными на расстоянии от ~300 до 1300 м до базовой станции. Точки выбирались так, чтобы охватить характерные для участка сочетания рельефа и почвенных условий. В каждой точке устройство устанавливалось в почву на одну из двух фиксированных глубин – 20 или 40 см от дневной поверхности. Скважины для установки выполнялись буром Эдельмана, после размещения логгера их заполняли извлеченной почвой с уплотнением. Для каждой комбинации “радиомодем – точка – глубина” регистрировались значения SNR и RSSI. Схема закладки эксперимента и взаимное расположение базовой станции и тестовых точек приведены на рисунке 2.

Передача телеметрии от каждого радиомодема осуществлялась один раз в сутки в автоматическом режиме. Для анализа качества связи использовали значения SNR и RSSI, зарегистрированные на 2–4-е сутки после установки; данные первого и последнего дней не учитывали во избежание влияния возможной нестабильности в моменты монтажа и демонтажа оборудования, даты установки и переноса логгеров. Графики накопленных осадков представлены на рисунке 3.

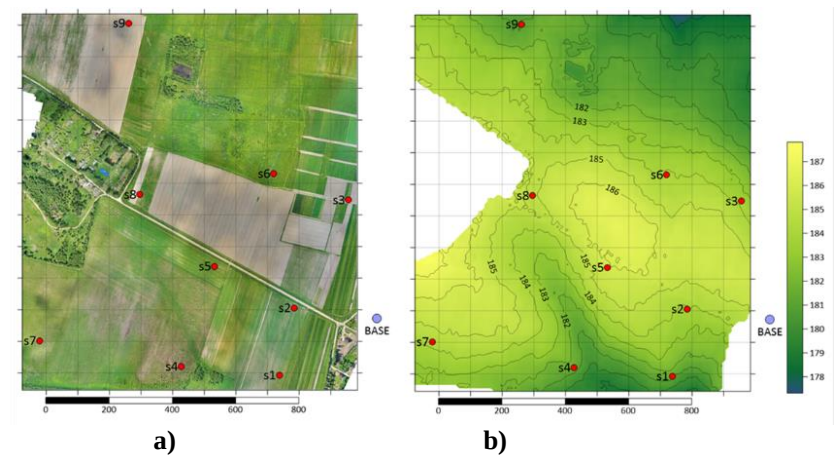


Рис. 2. Схема расположения базовой станции и **а)** точек закладки модемов ВТ100; **б)** цифровая модель рельефа.
Fig. 2. Location of the base station and **a)** the BT100 modem deployment points; **b)** the digital elevation model.

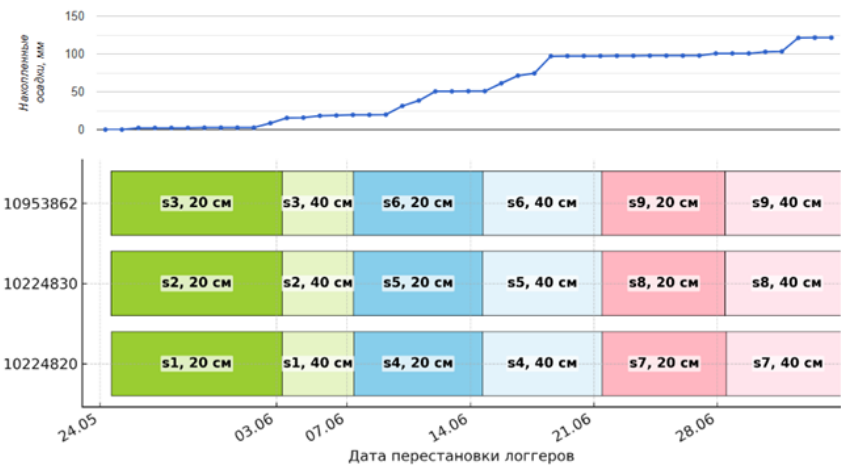


Рис. 3. Графики накопленных осадков и периоды работы логгеров в точках s1-s9.
Fig. 3. Cumulative precipitation and logger operation periods at points s1-s9.

Эксперимент проводился в условиях текущих погодных условий без специального управления увлажнением или другими факторами среды. В рамках настоящей работы пространственно-временная изменчивость влагосодержания и гранулометрического состава почв не анализируется детально: основной акцент сделан на принципиальной оценке возможности устойчивой передачи NB-Fi-сигнала через почвенную толщу при заглублении логгеров.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исходные данные о качестве связи (SNR и RSSI) формировались автоматически инфраструктурой сети NB-Fi и ПО оператора WAVEIoT. Для каждого логгера и каждых суток фиксировались все принятые пакеты с привязкой к идентификатору устройства и времени. На этапе предварительной обработки данные были агрегированы в виде средних значений SNR и RSSI для каждой комбинации “радиомодем – точка – глубина” за период работы устройства.

Полученные средние значения были сопоставлены с координатами точек наблюдений и далее пространственно интерполированы отдельно для двух глубин заложения (20 и 40 см). Для этого использовался инструментарий библиотеки SciPy на Python с реализацией метода ближайшего соседа (nearest neighbour), позволяющий по значениям в точках измерения построить регулярное поле SNR и RSSI на всей площади тестового участка. В результате были получены четыре карты: SNR на глубине 20 и 40 см и RSSI на глубине 20 и 40 см (рис. 4).

Во всем диапазоне расстояний от базовой станции (от ~300 до 1300 м) сохранялся приемлемый уровень качества сигнала при заглублении модемов на 20–40 см. По полевым картам средние значения SNR варьировали в пределах от 27 до 9 дБ, что соответствует переходу от “очень хорошего” к “удовлетворительному” качеству канала. RSSI изменялся в диапазоне примерно от –90 до –120 дБм, то есть уровень принимаемого сигнала оставался выше порогов чувствительности приемника NB-Fi во всех точках поля. В среднем при увеличении расстояния до базовой станции уровень сигнала ухудшался.

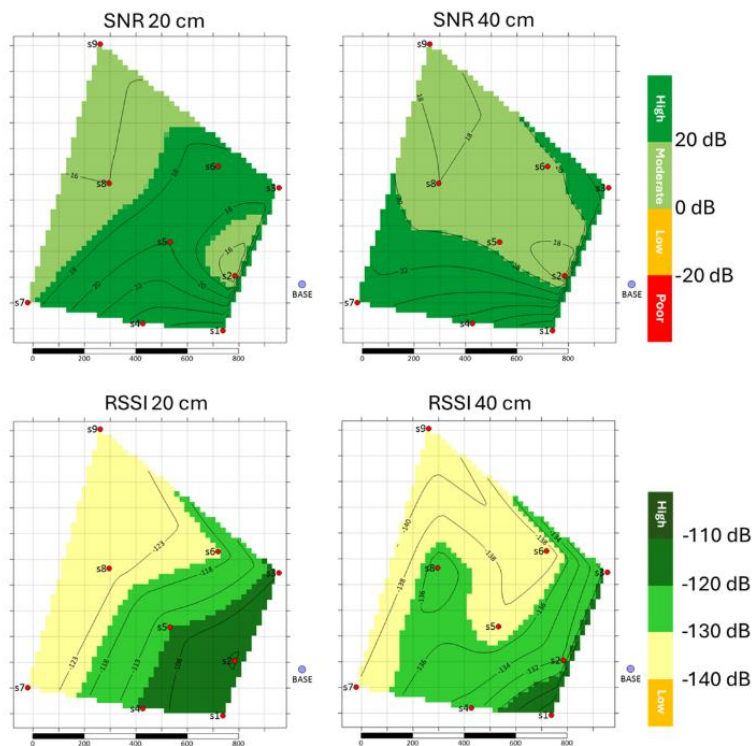


Рис. 4. Пространственная изменчивость значений SNR и RSSI для 9 точек на глубинах 20 и 40 см.

Fig. 4. Spatial variability of SNR and RSSI values at nine points at depths of 20 and 40 cm.

Анализ суточных данных SNR и RSSI для трех логов NB-Fi показал, что при заглублении на 20–40 см и расстояниях до базовой станции 340–860 м радиоканал в целом сохранял устойчивость. На минимальных расстояниях (340–460 м) при глубине 20 см значения SNR в большинстве случаев лежали в диапазоне примерно 10–25 дБ (с отдельными максимумами до 30–33 дБ), а RSSI – порядка –125 – –138 дБм, что соответствует уверенной зоне приема с запасом относительно паспортной чувствительности прием-

ника NB-Fi. При увеличении расстояния до 570–680 м и особенно до 1270 м, а также при переходе на глубину 40 см наблюдалось ожидаемое ухудшение параметров в связи с увеличением расстояния от логгера до базовой станции: SNR чаще находился в интервале 5–15 дБ, а RSSI изредка опускался до –140 – –143 дБм, однако даже в этих условиях фиксировались положительные значения SNR и стабильный прием пакетов.

Отдельные дни характеризовались кратковременным ухудшением канала (SNR вплоть до ~0 дБ и RSSI около –143 дБм), что можно интерпретировать как эпизодические сбои или коллизии в сети, но не как устойчивую потерю связи. В целом по всему диапазону расстояний (от ~300 до ~1300 м) и для обеих глубин заложения логгеров не зафиксировано конфигураций, при которых связь полностью прекращалась; параметры SNR и RSSI оставались в диапазоне, обеспечивающем работоспособность NB-Fi-канала для задач подземного мониторинга почв.

Таким образом, полевые испытания на полигоне ВНИИМЗ показали, что передача сигнала NB-Fi протоколом обеспечивает устойчивую доставку данных от подземных логгеров, заглубленных на 20–40 см, на расстояние до 1.3 км в реальных полевых условиях.

Полученные результаты подтверждают, что узкополосный фазоманипулирующий протокол NB-Fi, изначально разработанный для классических задач городского интернета вещей, может сохранять устойчивый канал связи и в условиях подземного размещения логгеров в почвах агроландшафта. При заглублении логгеров на 20–40 см в дерново-подзолистых суглинистых почвах и расстояниях до базовой станции до 1.3 км параметры SNR и RSSI оставались в диапазоне, обеспечивающем прием пакетов без устойчивой потери связи. Это принципиально важно с точки зрения практической реализуемости концепции подземного интернета вещей (IoUT) применительно к задачам мониторинга водного режима почв.

Отдельно следует отметить, что на момент проведения эксперимента на рынке фактически отсутствовали готовые решения, сочетающие NB-Fi-технологии и конструктивную пригодность для долгосрочной работы в агрессивной почвенной среде. В

настоящей работе акцент сделан на оценке работоспособности радиоканала в почве; конструктивные и схемотехнические особенности устройства рассматриваются только в той мере, в какой они необходимы для интерпретации результатов связи.

Сопоставление полученных результатов с опубликованными работами по WUSN/IoUT показывает, что достигнутый радиус действия и глубина заложения логгеров находятся на верхней границе или несколько превышают типичные значения для электромагнитной связи в почве. Полевые эксперименты с LoRa в почвах, как правило, имеют устойчивый прием при заглублении датчиков на 10–20 см и расстояниях до сотен метров в относительно сухих условиях, тогда как увеличение глубины и влажности быстро приводит к потере связи. В настоящем исследовании устойчивая радиосвязь сохранялась при заглублении радиомодема на 20–40 см и расстояниях до 0.8–1.3 км, хотя RSSI при этом приближался к порогам чувствительности приемника. Это указывает на то, что возможности технологии NB-Fi частично компенсируют затухание сигнала в почве как среды распространения радиосигнала. Вместе с тем оптимизация настройки антенны базовой станции/ретранслятора (выбор типа и коэффициента усиления антенны, ее высоты установки и ориентации относительно тестового участка) должны позволить увеличить и, тем самым расширить диапазон допустимых расстояний и глубин установки модемов.

С другой стороны, NB-Fi остается классическим электромагнитным решением с присущей ему чувствительностью к диэлектрическим свойствам и влажности почвы. Тот факт, что в рамках данного эксперимента не было зафиксировано устойчивой потери связи при изменяющихся погодных условиях, нельзя интерпретировать как универсальную характеристику технологии: в более тяжелых, переувлажненных или засоленных почвах затухание может оказаться существенно выше. В этом смысле наши результаты следует рассматривать как демонстрацию работоспособности NB-Fi в конкретных условиях.

Выполненный эксперимент имеет ряд методических ограничений. Во-первых, использовалось всего три подземных логгера и наблюдения проводились на протяжении относительно небольшого периода, что не позволяет полноценно определить вклад от-

дельных факторов среды. Во-вторых, изменения влажности и температуры почвы, гранулометрического состава, микрорельефа, а также погодных условий и температуры воздуха учитывались лишь косвенно, как фоновые условия конкретного сезона, и не были предметом целенаправленного статистического анализа.

Понимание этих ограничений задает направления дальнейшей работы. Во-первых, необходимы специализированные эксперименты с варьированием влажности, температуры и плотности почвы, а также с учетом рельефа и экспозиции, что позволит количественно оценить чувствительность параметров SNR и RSSI к состоянию почвы. Во-вторых, перспективным представляется развитие адаптивных алгоритмов передачи для подземных узлов: динамическая корректировка частоты опроса и объема передаваемых данных в зависимости от состояния почвы и уровня помех, временное накопление измерений во внутренней памяти с последующей передачей в более благоприятные интервалы (например, в ночные часы с меньшим уровнем электромагнитных шумов или при уменьшении влажности почвы), оптимизация битовой скорости и мощности передатчика. Такие подходы могут существенно повысить надежность передачи данных и энергоэффективность подземных логгеров в условиях, близких к предельным для электромагнитной связи.

С точки зрения задачи построения мониторинговых сетей почв агроландшафтов важно то, что NB-Fi позволяет полностью исключить наземную инфраструктуру в условиях обработки полей сельскохозяйственной техникой: логгеры могут размещаться внутри почвы без вывода антенн на поверхность и без установки солнечных панелей. Это снижает риск их механических повреждений и упрощает схемы размещения.

Полученные результаты, подтвердившие принципиальную работоспособность NB-Fi-связи при установке логгеров в почву, являются основой разработки специализированного подземного прибора мониторинга. В дальнейшем предполагается адаптировать конструкцию и алгоритмы передачи данных с учетом особенностей различных типов почв и режимов увлажнения.

ВЫВОДЫ

Поставленный эксперимент на агрополигоне ВНИИМЗ показал, что технология NB-Fi обеспечивает работоспособный радиоканал при подземном размещении логгеров в дерново-подзолистых суглинистых почвах: при заглублении на 20–40 см устойчивый прием пакетов сохранялся на расстояниях до 1.3 км от базовой станции. Значения SNR и RSSI во всем диапазоне глубин и расстояний оставались выше порогов чувствительности приемника NB-Fi, что позволяет рассматривать данную технологию как перспективную основу для подземных сенсорных сетей (WUSN/IoUT) мониторинга водного режима почв без вывода антенн на дневную поверхность. Полученные результаты имеют пилотный характер: эксперимент выполнялся с ограниченным числом логгеров и в течение одного сезона, без детального учета пространственно-временной изменчивости влажности, температуры и гранулометрического состава почв. Это определяет необходимость дальнейших исследований, направленных на оптимизацию антенн и режимов работы NB-Fi, выбора мощности передачи сигналов, емкости батарей, а также разработку адаптивных алгоритмов передачи данных с учетом состояния почвы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 70036–2022. Информационные технологии. Интернет вещей. Протокол беспроводной передачи данных на основе узкополосной модуляции радиосигнала (NB-Fi); Стандартинформ: Москва, 2022.
2. Национальный доклад “Глобальный климат и почвенный покров России: оценка рисков и эколого-экономических последствий деградации земель. Адаптивные системы и технологии рационального природопользования (сельское и лесное хозяйство)”; Почвенный институт им. В.В. Докучаева; ГЕОС: Москва, 2018; Т. 1, 357 с.
3. Национальный доклад “Глобальный климат и почвенный покров России: проявления засухи, меры предупреждения, борьбы, ликвидация последствий и адаптационные мероприятия (сельское и лесное хозяйство)”; ООО “Издательство МБА”: Москва, 2021; Т. 3, 700 с.
4. Филь, П.П.; Болотов, А.Г.; Козлов, Д.Н.; Фомин, Д.С.; Хархардинов, Н.А. Технологии подземного интернета вещей в мониторинге почв. В *“Почвоведение: горизонты будущего”*: сб. тезисов докладов VIII Все-

рос. конференции молодых ученых с международным участием; Почвенный институт им. В.В. Докучаева: Москва, 2024; С. 279–280.

5. Шеин, 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 имени В.В. Докучаева* **2023**, (117), 5–22. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2023-117-5-22>.

6. WAVIoT. NB-Fi – стандарт интернета вещей. Официальный сайт компании WAVIoT. <https://waviot.ru>.

7. Anvari, K.; Benndorf, J. Real Time Mining – A Review of Developments within the Last Decade. *Mining* **2025**, (5), 38. <https://doi.org/10.3390/mining5030038>.

8. Bankov, D.V.; Lyakhov, A.I.; Pavlova, I.D.; Khorov, E.M. On the Efficiency of Carrier Sense Multiple Access in NB-Fi Networks. *Journal of Communications Technology and Electronics* **2022**, (67), 137–143. <https://doi.org/10.1134/S1064226922130010>.

9. Bing, Z.; Wang, X.; Dong, Z.; Dong, L.; He, T. A Novel Edge Computing Architecture for Intelligent Coal Mining System. *Wireless Networks* **2023**, (29), 1545–1554. <https://doi.org/10.1007/s11276-021-02858-x>.

10. Cariou, C.; Moiroux-Arvis, L.; Pinet, F.; Chanut, J.-P. Internet of Underground Things in Agriculture 4.0: Challenges, Applications and Perspectives. *Sensors* **2023**, (23), 4058. <https://doi.org/10.3390/s23084058>.

11. Da Silva, A.R.; Moghaddam, M.; Liu, M. The Future of Wireless Underground Sensing Networks Considering Physical Layer Aspects. In *The Art of Wireless Sensor Networks. Vol. 2: Advanced Topics and Applications*; Springer: Berlin; Heidelberg, 2013; pp 451–484. https://doi.org/10.1007/978-3-642-40066-7_12.

12. Finke, P.A. On Digital Soil Assessment with Models and the Pedometrics Agenda. *Geoderma* **2012**, (171), 3–15. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.01.001>.

13. Hardie, M.; Hoyle, D. Underground Wireless Data Transmission Using 433-MHz LoRa for Agriculture. *Sensors* **2019**, (19), 4232. <https://doi.org/10.3390/s19194232>.

14. Hersbach, H.; Bell, B.; Berrisford, P.; Hirahara, S.; Horányi, A.; Muñoz-Sabater, J.; Nicolas, J.; Peubey, C.; Radu, R.; Schepers, D.; Simmons, A.; Soci, C.; Abdalla, S.; Abellan, X.; Balsamo, G.; Bechtold, P.; Biavati, G.; Bidlot, J.; Bonavita, M.; De Chiara, G.; Dahlgren, P.; Dee, D.; Diamantakis, M.; Dragani, R.; Flemming, J.; Forbes, R.; Fuentes, M.; Geer, A.; Haimberger, L.; Healy, S.; Hogan, R.J.; Hólm, E.; Janisková, M.; Keeley, S.; Laloyaux, P.; Lopez, P.; Lupu, C.; Radnoti, G.; de Rosnay, P.; Rozum, I.; Vamborg, F.; Villaume, S.; Thépaut, J.-N. The ERA5 Global Reanalysis. *Quarterly Journal*

- of the Royal Meteorological Society **2020**, (146), 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>.
15. Huang, H.; Shi, J.; Wang, F.; Zhang, D. Theoretical and Experimental Studies on the Signal Propagation in Soil for Wireless Underground Sensor Networks. *Sensors* **2020**, (20), 2580. <https://doi.org/10.3390/s20092580>.
16. Levchenko, P.; Bankov, D.; Khorov, E.; Lyakhov, A. Performance Comparison of NB-Fi, Sigfox and LoRaWAN. *Sensors* **2022**, (22), 9633. <https://doi.org/10.3390/s22249633>.
17. Li, M.; Liu, Y. Underground Coal Mine Monitoring with Wireless Sensor Networks. *ACM Transactions on Sensor Networks* **2009**, (5), 1. <https://doi.org/10.1145/1498915.1498916>.
18. Liang, M.-C.; Chen, H.-E.; Tfwala, S.S.; Lin, Y.-F.; Chen, S.-C. The Application of Wireless Underground Sensor Networks for Seepage Monitoring in Earth Dams. *Sensors* **2023**, (23), 3795. <https://doi.org/10.3390/s23083795>.
19. Liu, C.; Su, X.; Li, C. Edge Computing for Data Anomaly Detection of Multi-Sensors in Underground Mining. *Electronics* **2021**, (10), 302. <https://doi.org/10.3390/electronics10030302>.
20. Moiroux-Arvis, L.; Cariou, C.; Chanet, J.-P. Evaluation of LoRa Technology in 433-MHz and 868-MHz for Underground to Aboveground Data Transmission. *Computers and Electronics in Agriculture* **2022**, (194), 106770. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.106770>.
21. Moridi, M.A.; Kawamura, Y.; Sharifzadeh, M.; Chanda, E.K.; Wagner, M.; Jang, H.; Okawa, H. Development of Underground Mine Monitoring and Communication System Integrated ZigBee and GIS. *International Journal of Mining Science and Technology* **2015**, (25), 811–818. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2015.07.017>.
22. Pathegama, G.R.; Zhao, J.; Ju, M.; De Silva, R.V.S.; Rathnaweera, T.D.; Bandara, A.K. Opportunities and Challenges in Deep Mining: A Brief Review. *Engineering* **2017**, (3), 546–551. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2017.04.024>.
23. Sadeghioon, A.M.; Chapman, D.N.; Metje, N.; Anthony, C.J. A New Approach to Estimating the Path Loss in Underground Wireless Sensor Networks. *Journal of Sensor and Actuator Networks* **2017**, (6), 18. <https://doi.org/10.3390/jsan6030018>.
24. Santos, R.C.P. dos; da Silva, J.M.; Junior, W.A.; Pinto, C.L.; Oliveira, M.M.; Mazzinghy, D.B. Development of a Low-Cost Device for Monitoring Ventilation Parameters (Temperature, Humidity and Pressure) in Underground Environments to Increase Operational Safety Using IoT. *Mining* **2022**, (2), 746–756. <https://doi.org/10.3390/mining2040041>.
25. Vuran, M.C.; Akyildiz, I.F. Channel Model and Analysis for Wireless Underground Sensor Networks in Soil Medium. *Physical Communication* **2010**, (3), 245–254. <https://doi.org/10.1016/j.phycom.2010.07.001>.

26. Vuran, M.C.; Salam, A.; Wong, R.; Irmak, S. Internet of Underground Things in Precision Agriculture: Architecture and Technology Aspects. *Ad Hoc Networks* **2018**, (81), 160–173. <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2018.07.017>.
27. Wei, Q.; Zhu, S.; Du, C. Study on Key Technologies of Internet of Things Perceiving Mine. *Procedia Engineering* **2011**, (26), 2326–2333. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.2442>.
28. Wu, Y.; Chen, M.; Wang, K.; Fu, G. A Dynamic Information Platform for Underground Coal Mine Safety Based on Internet of Things. *Safety Science* **2019**, (113), 9–18. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.11.003>.
29. Zhang, H.; Li, B.; Karimi, M.; Saydam, S.; Hassan, M. Recent Advancements in IoT Implementation for Environmental, Safety, and Production Monitoring in Underground Mines. *IEEE Internet of Things Journal* **2023**, (10), 14507–14526. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2023.3267828>.
30. Zhang, X.; Feng, G.; Sun, X. Advanced Technologies of Soil Moisture Monitoring in Precision Agriculture: A Review. *Journal of Agriculture and Food Research* **2024**, (18), 101473. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101473>.

REFERENCES

1. GOST R 70036–2022 (Russian Standard); Standartinform: Moscow, 2022. (In Russ.)
2. National Report “Global Climate and Soil Cover of Russia: Assessment of Risks and Environmental and Economic Consequences of Land Degradation. Adaptive Systems and Technologies of Rational Nature Management (Agriculture and Forestry)”; V.V. Dokuchaev Soil Science Institute; GEOS: Moscow, 2018; Vol. 1, 357 p. (In Russ.)
3. National Report “Global Climate and Soil Cover of Russia: Manifestations of Drought, Prevention Measures, Control, Elimination of Consequences and Adaptation Activities (Agriculture and Forestry)”; ООО “Izdatel’stvo MBA”: Moscow, 2021; Vol. 3, 700 p. (In Russ.)
4. Fil’, P.P.; Bolotov, A.G.; Kozlov, D.N.; Fomin, D.S.; Kharkhardinov, N.A. Subsurface Internet of Things Technologies for Soil Monitoring. In *Soil Science: Horizons of the Future, Proc. 8th All-Russian Conference of Young Scientists with International Participation*; V.V. Dokuchaev Soil Science Institute: Moscow, 2024. (In Russ.)
5. 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**, (117), 5–22. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2023-117-5-22>. (In Russ.)

6. WAVIoT. NB-Fi – Internet of Things Standard. Official Website of the WAVIoT Company. <https://waviot.ru>.
7. Anvari, K.; Benndorf, J. Real Time Mining – A Review of Developments within the Last Decade. *Mining* **2025**, (5), 38. <https://doi.org/10.3390/mining5030038>.
8. Bankov, D.V.; Lyakhov, A.I.; Pavlova, I.D.; Khorov, E.M. On the Efficiency of Carrier Sense Multiple Access in NB-Fi Networks. *Journal of Communications Technology and Electronics* **2022**, (67), 137–143. <https://doi.org/10.1134/S1064226922130010>.
9. Bing, Z.; Wang, X.; Dong, Z.; Dong, L.; He, T. A Novel Edge Computing Architecture for Intelligent Coal Mining System. *Wireless Networks* **2023**, (29), 1545–1554. <https://doi.org/10.1007/s11276-021-02858-x>.
10. Cariou, C.; Moiroux-Arvis, L.; Pinet, F.; Chanut, J.-P. Internet of Underground Things in Agriculture 4.0: Challenges, Applications and Perspectives. *Sensors* **2023**, (23), 4058. <https://doi.org/10.3390/s23084058>.
11. Da Silva, A.R.; Moghaddam, M.; Liu, M. The Future of Wireless Underground Sensing Networks Considering Physical Layer Aspects. In *The Art of Wireless Sensor Networks. Vol. 2: Advanced Topics and Applications*; Springer: Berlin; Heidelberg, 2013; pp 451–484. https://doi.org/10.1007/978-3-642-40066-7_12.
12. Finke, P.A. On Digital Soil Assessment with Models and the Pedometrics Agenda. *Geoderma* **2012**, (171), 3–15. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.01.001>.
13. Hardie, M.; Hoyle, D. Underground Wireless Data Transmission Using 433-MHz LoRa for Agriculture. *Sensors* **2019**, (19), 4232. <https://doi.org/10.3390/s19194232>.
14. Hersbach, H.; Bell, B.; Berrisford, P.; Hirahara, S.; Horányi, A.; Muñoz-Sabater, J.; Nicolas, J.; Peubey, C.; Radu, R.; Schepers, D.; Simmons, A.; Soci, C.; Abdalla, S.; Abellan, X.; Balsamo, G.; Bechtold, P.; Biavati, G.; Bidlot, J.; Bonavita, M.; De Chiara, G.; Dahlgren, P.; Dee, D.; Diamantakis, M.; Dragani, R.; Flemming, J.; Forbes, R.; Fuentes, M.; Geer, A.; Haimberger, L.; Healy, S.; Hogan, R.J.; Hólm, E.; Janisková, M.; Keeley, S.; Laloyaux, P.; Lopez, P.; Lupu, C.; Radnoti, G.; de Rosnay, P.; Rozum, I.; Vamborg, F.; Villaume, S.; Thépaut, J.-N. The ERA5 Global Reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **2020**, (146), 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>.
15. Huang, H.; Shi, J.; Wang, F.; Zhang, D. Theoretical and Experimental Studies on the Signal Propagation in Soil for Wireless Underground Sensor Networks. *Sensors* **2020**, (20), 2580. <https://doi.org/10.3390/s20092580>.

16. Levchenko, P.; Bankov, D.; Khorov, E.; Lyakhov, A. Performance Comparison of NB-Fi, Sigfox and LoRaWAN. *Sensors* **2022**, (22), 9633. <https://doi.org/10.3390/s22249633>.
17. Li, M.; Liu, Y. Underground Coal Mine Monitoring with Wireless Sensor Networks. *ACM Transactions on Sensor Networks* **2009**, (5), 1. <https://doi.org/10.1145/1498915.1498916>.
18. Liang, M.-C.; Chen, H.-E.; Tfwala, S.S.; Lin, Y.-F.; Chen, S.-C. The Application of Wireless Underground Sensor Networks for Seepage Monitoring in Earth Dams. *Sensors* **2023**, (23), 3795. <https://doi.org/10.3390/s23083795>.
19. Liu, C.; Su, X.; Li, C. Edge Computing for Data Anomaly Detection of Multi-Sensors in Underground Mining. *Electronics* **2021**, (10), 302. <https://doi.org/10.3390/electronics10030302>.
20. Moiroux-Arvis, L.; Cariou, C.; Chanut, J.-P. Evaluation of LoRa Technology in 433-MHz and 868-MHz for Underground to Aboveground Data Transmission. *Computers and Electronics in Agriculture* **2022**, (194), 106770. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.106770>.
21. Moridi, M.A.; Kawamura, Y.; Sharifzadeh, M.; Chanda, E.K.; Wagner, M.; Jang, H.; Okawa, H. Development of Underground Mine Monitoring and Communication System Integrated ZigBee and GIS. *International Journal of Mining Science and Technology* **2015**, (25), 811–818. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2015.07.017>.
22. Pathegama, G.R.; Zhao, J.; Ju, M.; De Silva, R.V.S.; Rathnaweera, T.D.; Bandara, A.K. Opportunities and Challenges in Deep Mining: A Brief Review. *Engineering* **2017**, (3), 546–551. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2017.04.024>.
23. Sadeghioon, A.M.; Chapman, D.N.; Metje, N.; Anthony, C.J. A New Approach to Estimating the Path Loss in Underground Wireless Sensor Networks. *Journal of Sensor and Actuator Networks* **2017**, (6), 18. <https://doi.org/10.3390/jsan6030018>.
24. Santos, R.C.P. dos; da Silva, J.M.; Junior, W.A.; Pinto, C.L.; Oliveira, M.M.; Mazzinghy, D.B. Development of a Low-Cost Device for Monitoring Ventilation Parameters (Temperature, Humidity and Pressure) in Underground Environments to Increase Operational Safety Using IoT. *Mining* **2022**, (2), 746–756. <https://doi.org/10.3390/mining2040041>.
25. Vuran, M.C.; Akyildiz, I.F. Channel Model and Analysis for Wireless Underground Sensor Networks in Soil Medium. *Physical Communication* **2010**, (3), 245–254. <https://doi.org/10.1016/j.phycom.2010.07.001>.
26. Vuran, M.C.; Salam, A.; Wong, R.; Irmak, S. Internet of Underground Things in Precision Agriculture: Architecture and Technology Aspects. *Ad*

- Hoc Networks* **2018**, (81), 160–173.
<https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2018.07.017>.
27. Wei, Q.; Zhu, S.; Du, C. Study on Key Technologies of Internet of Things Perceiving Mine. *Procedia Engineering* **2011**, (26), 2326–2333.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.2442>.
28. Wu, Y.; Chen, M.; Wang, K.; Fu, G. A Dynamic Information Platform for Underground Coal Mine Safety Based on Internet of Things. *Safety Science* **2019**, (113), 9–18. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.11.003>.
29. Zhang, H.; Li, B.; Karimi, M.; Saydam, S.; Hassan, M. Recent Advancements in IoT Implementation for Environmental, Safety, and Production Monitoring in Underground Mines. *IEEE Internet of Things Journal* **2023**, (10), 14507–14526.
<https://doi.org/10.1109/JIOT.2023.3267828>.
30. Zhang, X.; Feng, G.; Sun, X. Advanced Technologies of Soil Moisture Monitoring in Precision Agriculture: A Review. *Journal of Agriculture and Food Research* **2024**, (18), 101473. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101473>.

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2026-129-27-42



Ссылки для цитирования:

Столбовой В.С., Гребенников А.М. Модель баланса гумуса для продвижения рапса в регенеративное земледелие и низкоуглеродную экономику Российской Федерации // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2026. Вып. 129. С. 27-42. DOI: 10.19047/0136-1694-2026-129-27-42

Cite this article as:

Stolbovoy V.S., Grebennikov A.M., A humus balance model for promoting rapeseed in regenerative agriculture and a low-carbon economy in the Russian Federation, Dokuchaev Soil Bulletin, 2026, V. 129, pp. 27-42, DOI: 10.19047/0136-1694-2026-129-27-42

Благодарность.

Работа выполнена по плану НИР ФИЦ “Почвенный институт им. В.В. Докучаева”.

Вклад авторов. Столбовой В.С. – концепция статьи, введение, заключение, резюме, участие в разделе результаты и обсуждение. Гребенников А.М. – подготовка данных и математические расчеты. Раздел объекты и методы. Участие в разделе результаты и обсуждение.

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

Заявление об использовании технологий искусственного интеллекта. При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовались.

Заявление о доступности данных.

Все данные, полученные в ходе этого исследования, включены в опубликованную статью.

Acknowledgments.

The work was carried out in accordance with the research plan of the Federal Research Center “V.V. Dokuchaev Soil Science Institute.”

Authors’ contributions. Stolbovoy V.S. – article concept, introduction, conclusion, summary, participation in the results and discussion section. Grebennikov A.M. – data preparation and mathematical calculations, section “Objects and Methods”, participation in the “Results and discussion” section.

Conflicts of interest. The authors declare that there is no conflict of interest.

Statement on the use of artificial intelligence technologies.

No generative artificial intelligence technologies were used in the creation of this article.

Data availability.

All data obtained during this study are included in the published article.

Модель баланса гумуса для продвижения рапса в регенеративное земледелие и низкоуглеродную экономику Российской Федерации

© 2026 г. В. С. Столбовой*, А. М. Гребенников

*ФИЦ “Почвенный институт им. В.В. Докучаева”, Россия,
119017, Москва, Пыжевский пер, 7, стр. 2,
e-mail: vladimir.stolbovoy@gmail.com.

*Поступила в редакцию 26.02.2026, после доработки 18.03.2026,
принята к публикации 21.08.2026*

Резюме: Цель исследования – оценить применимость рапса в качестве культуры для продвижения регенеративного земледелия и определить потенциал культуры для стимулирования развития низкоуглеродной экономики в Российской Федерации. Использована новейшая отечественная модель управления бюджетом гумуса (БГ) для почв агроэкосистем. Расчеты БГ под посевами ярового и озимого рапса проводились на основе данных об урожайности рапса, которые находятся в свободном доступе государственной статистики. Рассматривались два варианта формирования биомассы гумусообразования: 1) сокращенный – сумма корневых и пожнивных растительных остатков; 2) расширенный – сумма корневых, пожнивных растительных остатков и побочной продукции. В сокращенном варианте формирования биомассы гумусообразования озимого рапса БГ был положительным, и почва накапливает около 2.2 ц/га гумуса. В этом варианте БГ при выращивании ярового рапса отрицательный, и почвы ежегодно теряют около 1.4 ц/га гумуса. При расширенном поступлении биомассы гумусообразования в почву БГ для озимого и ярового рапса положительный. Почвы демонстрируют расширенное воспроизводство плодородия, что соответствует целям регенеративного земледелия. Озимый рапс может использоваться для регенеративного земледелия без ограничений. Культура ярового рапса может использоваться только в варианте расширенного поступления биомассы гумусообразования. Возделывание озимого рапса потенциально приводит к закреплению гумуса в почве, что в пересчете на углеродные единицы составляет +0.48

т CO_2 -экв./га. Возделывание ярового рапса сопровождается потерей гумуса в количестве -0.30 т CO_2 -экв./га. Вследствие 4-кратного превышения посевных площадей ярового рапса над озимой культурой суммарное количество углеродных единиц в РФ может составить -0.433 млн т CO_2 -экв. В условиях расширенного поступления биомассы гумусообразования производство озимого и ярового рапса может привести к поглощению почвой около $+5.714$ млн т CO_2 -экв., что составляет почти 5% годового выброса углеродных единиц сельскохозяйственным сектором экономики РФ в 2022 г. Использование озимого рапса для целей развития низкоуглеродной экономики в РФ возможно без ограничений. Применение ярового рапса в этих целях возможно только в технологии расширенного поступления биомассы гумусообразования.

Ключевые слова: почвенное органическое вещество; климатический проект; плодородие почв; эмиссия и поглощение углерода; углеродные единицы.

A humus balance model for promoting rapeseed in regenerative agriculture and a low-carbon economy in the Russian Federation

© 2026 V. S. Stolbovoy*, A. M. Grebennikov

Federal Research Centre “V.V. Dokuchaev Soil Science Institute”,
7 Bld. 2 Pyzhevskiy per., Moscow 119017, Russian Federation,
*e-mail: vladimir.stolbovoy@gmail.com.

Received 26.02.2026, Revised 18.03.2026, Accepted 21.08.2026

Abstract: The aim of the study is to evaluate the applicability of rapeseed as a crop for promoting regenerative agriculture and to determine the crop's potential for stimulating the development of a low-carbon economy in the Russian Federation (RF). A state-of-the-art domestic model for managing the humus budget (HB) for soils in agroecosystems was used. HB calculations for spring and winter rapeseed were based on rapeseed yield data publicly available from state statistics. Two options for generating humus-forming biomass were considered: 1) reduced – the sum of root and stubble plant residues; 2) expanded – the sum of root, stubble plant residues and by-products. The HB in the reduced version of the humus-forming biomass of winter rapeseed was positive, and the soil accumulated approximately 2.2 c/ha. In this version of growing spring rapeseed, the HB was negative, and the soils annually lose approximately 1.4 c/ha of humus. With the expanded input

of humus-forming biomass into the soil, the HB for winter and spring rapeseed was positive. The soils demonstrated extended fertility restoration, which corresponds to the goals of regenerative agriculture. Winter rapeseed can be used for regenerative farming without restrictions. Spring rapeseed can only be used in the case of increased biomass input for humus formation. Cultivation of winter rapeseed results in humus fixation in the soil, which, when converted into carbon units, amounts to $+0.48 \text{ t CO}_2\text{-eq/ha}$. Cultivation of spring rapeseed results in humus loss of $-0.30 \text{ t CO}_2\text{-eq/ha}$. Because the area under spring rapeseed is fourfold greater than that under winter rapeseed, the total amount of carbon units in the RF is -0.433 million $\text{t-CO}_2\text{-eq}$. With increased input of humus-forming biomass, winter and spring rapeseed production can result in soil absorption of approximately 5.714 million tons of $\text{CO}_2\text{-eq}$, which represents approximately 5% of the annual carbon emissions of the Russian agricultural sector in year 2022. The use of winter rapeseed for the development of a low-carbon economy in the RF is permitted without restrictions. The use of spring rapeseed for these purposes is only possible with increased input of humus-forming biomass.

Keywords: soil organic matter; climate project; soil fertility; carbon emission and absorption; carbon units.

ВВЕДЕНИЕ

Современный этап интенсификации сельскохозяйственного производства противоречив и характеризуется высокой урожайностью культур на фоне усиления негативных явлений, включая ухудшение качества питьевой воды, снижение биоразнообразия и др. Это развитие привело к росту интереса производителей к регенеративному (восстановительному) земледелию, которое стремится вернуться к природе и ее естественным процессам саморегуляции и взаимосвязям (Pytlik, 2021). Ученых и практиков привлекают долгосрочные преимущества, такие как улучшение здоровья почвы, экономия продуктивных запасов влаги, повышение микробиологической активности, снижение затрат на производство, возможность установления более высоких цен на органическую продукцию и др. В настоящее время идея встраивания сельскохозяйственного производства в систему самообновления природы вышла за рамки академических теорий и утвердилась на переднем крае аграрных практик развитых стран. Так в “Почвенной стратегии 2030” Европейского Союза (ЕС) декларировано, что переход

на регенеративное земледелие позволяет повысить устойчивость и здоровье почв, экосистем и ландшафтов и является основой функционирования циркуляционной экономики, становление которой намечается до 2050 г. (Иванов и др., 2022). Другим примером приведем запуск в 2025 г. Министерством сельского хозяйства США (USDA) пилотной программы по регенеративному земледелию стоимостью 700 миллионов долларов США. Цель программы – помочь фермерам внедрить методы, улучшающие здоровье почвы, повышающие качество воды и увеличивающие долгосрочную производительность для укрепления продовольственного и сырьевого обеспечения страны (Natural..., 2026).

Восстановление содержания гумуса в почвах входит в число приоритетов регенеративного земледелия. Ключевым фактором пополнения почвы гумусом на землях сельскохозяйственного назначения является наличие растительных остатков, образующихся на полях после сбора урожая. Эти остатки служат биомассой для гумусообразования, увеличение обилия которой стимулирует обогащение почвы гумусом (Столбовой и др., 2025).

Объем растительных остатков, остающихся в поле после уборки рапса, значительно превосходит аналогичные показатели для других масличных культур. Отмечено, что переход от выращивания подсолнечника к озимому рапсу привел к увеличению выхода растительных остатков на 27.3%. При этом доля корневых остатков возросла с 50.1% до 75.8%. Замена подсолнечника на озимый рапс оказалась сопоставима с дополнительным внесением 8.6 т/га навоза (Курбанов и др., 2009). Аналогичные данные приводятся и в других исследованиях, согласно которым заделка растительных остатков рапса после уборки на семена эквивалентна внесению 10–30 т навоза на гектар (Артемов, 1992; Емельянов, 1999; и др.).

Производство рапса признается МСХ РФ драйвером роста рынка масличных культур (Некрасов, 2024). Перспективность расширения посевных площадей отмечается для северных нечерноземных районов на территориях ввода в сельскохозяйственный оборот залежных земель. Географическое положение РФ способствует тому, что рапс может включаться в севооборот во всех природно-климатических зонах, где он, как альтернатива сои, ана-

логичен по маржинальности и доходности сельхозтоваропроизводителей.

Для сельскохозяйственных предприятий увеличение производства рапса является достаточно привлекательным по ряду причин:

- возделывание рапса экономически выгодно, при урожайности свыше 25 ц/га уровень рентабельности производства превышает 50%;
- продукты переработки рапса востребованы как на внутреннем, так и внешнем рынках;
- посевы рапса являются хорошим предшественником для зерновых культур;
- в результате переработки рапса получают такие ценные побочные продукты, как глицерин, жмых и шрот;
- рапс задерживает питательные вещества в почве, улучшает ее структуру, поддерживает уровень плодородия, хорошо перерабатывает органические удобрения;
- солома рапса используется в качестве топлива в фермерских хозяйствах, а также органического удобрения и отчасти в кормопроизводстве;
- рапс – отличный медонос (с 1 га посевов пчелы собирают до 90 кг меда).

Помимо отмеченных плюсов, стоит подчеркнуть значимость рапса для производства биотоплива как замены традиционным углеводородным источникам. Биотопливо позиционируется как возобновляемая альтернатива. При таком рассмотрении прослеживается замкнутый цикл: углекислый газ, высвобождаемый при сжигании биотоплива, вновь поглощается растениями в ходе их роста, и из которых оно производится, что обеспечивает углеродную нейтральность.

Масло для биотоплива из рапса имеет значительные преимущества в экологическом отношении по сравнению с энергоносителями, полученными на основе ископаемых углеводородов. Так, при работе двигателей на биотопливе в выбросах отмечается лишь незначительное количество закиси азота, при отсутствии серы и других токсичных веществ. Рапсовое масло нетоксично, не загрязняет грунтовые воды и водоемы. При утечках полностью

разлагается в почве в течение трех недель. Показано, что рапсовое масло обеспечивает рекультивацию радиоактивно зараженных земель, снижает эмиссию парниковых газов на 25–50%, обеспечивает замкнутый круговорот углекислого газа (Киреева, 2008). В техническом отношении рапсовое масло не снижает ресурс двигателя, наиболее устойчиво к влиянию низких температур (до минус 10 °C), это самое безопасное горючее (точка воспламенения 325 °C) (Киреева, 2008).

Климатическая выгода от применения биотоплива измеряется объемом сниженных выбросов парниковых газов (в углеродных единицах) по сравнению с использованием ископаемого топлива. Эффективность биотоплива может возрасти, если культивация приводит к положительному БГ (пересчитанному на содержание углерода), то есть способствует дополнительному поглощению парникового газа (ПГ); или снизиться при отрицательном БГ, когда выращивание сырья для биотоплива истощает запасы гумуса, что приводит к эмиссии ПГ (Столбовой и др., 2025).

Цель исследования – определить БГ в почве, формирующийся при выращивании рапса на семена. Это позволит комплексно оценить потенциал культуры для развития регенеративного земледелия и стимулирования низкоуглеродной экономики в России. Представленные расчеты, основанные на обобщенных данных по стране, носят предварительный характер, однако служат аргументированным основанием для принятия стратегических управленческих решений относительно внедрения обозначенных перспективных практик.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

В исследовании использована новейшая отечественная модель управления БГ для почв агроэкосистем РФ (на основе работ Столбовой и др., 2024, 2025, 2026). Под бюджетом БГ подразумевается учет поступления и расхода гумуса в почве. Модель отличается универсальностью, включая анализ потенциала сельскохозяйственных культур для перехода к регенеративному земледелию, а также к организации почвенно-климатических инициатив, способствующих переходу к низкоуглеродной экономике.

Приходную часть БГ определяли по уравнениям регрессии

для рапса (Столбовой и др., 2024). Рассчитывали биомассу гумусообразования, которая включает поступление в почву побочной продукции, пожнивных и корневых остатков. Количество образующегося гумуса определяли как величину биомассы гумусообразования, умноженную на коэффициент гумификации соответствующей культуры.

Расходную часть БГ (минерализация) определяли по запасам гумуса в пахотном слое, умноженном на коэффициент минерализации гумуса в почве под посевами рапса и относительного индекса биологической продуктивности соответствующего административного района (Столбовой и др., 2024).

Для расчета БГ под посевами ярового и озимого рапса использовались данные государственной статистики по состоянию на 2018–2024 гг. (Росстат, 2023). Рассматривались два варианта формирования биомассы гумусообразования, практикуемые в современном сельскохозяйственном производстве РФ: 1) сокращенный – сумма корневых и пожнивных растительных остатков; 2) расширенный – сумма корневых, пожнивных растительных остатков и побочной продукции.

Применена достоверная регрессионная зависимость (Курбанов и др., 2009), которая имеет следующий вид:

$$y = 1.84x + 2.33,$$

где y – количество образующихся растительных остатков;
 x – урожайность семян рапса.

Для расчета количества побочной продукции урожай семян рапса умножался на 3 (Лапа и др., 2007). Коэффициент гумификации был взят равным 0.2 (Крылатов и др., 1998). Средневзвешенная по площади величина минерализации гумуса в РФ была установлена нами ранее (Столбовой и др., 2024; табл. 9) и составила 7.5 ц/га. С учетом изложенного БГ определялся как величина гумусообразования, умноженная на коэффициент гумификации (0.2), и вычитанием значения минерализации гумуса (7.5 ц/га).

Для оценки различий между урожайностями ярового и озимого рапса по годам исследований использовался метод разности пар между сопряженными последовательностями, в котором сте-

пень различия между ними определялась по значению коэффициента Стьюдента (Закс, 1976). Расчеты проводились по формуле:

$$t_f = d/sd = (\text{Sum } di)/n * \text{SQRT}((\text{SUM } d^2i - (\text{SUM } di)^2/n)/n \times (n - 1)),$$

где d – разность между сопряженными парами данных в сравниваемых рядах значений;

sd – стандартная ошибка;

n – объем выборки;

SUM – знак суммы;

SQRT – знак корня квадратного;

n – число пар в сравниваемых рядах.

При этом, если значение t_f было больше соответствующего табличного значения, то различия между сравниваемыми последовательностями были существенными. В случае, когда t_f меньше табличного значения, различия между последовательностями считались незначимыми.

Для перевода среднего значения величины БГ (ц/га) в углеродные единицы, измеряемые в тоннах CO_2 -эквивалентов (тCO_2 -экв./га), необходимо выполнить пересчет (Столбовой и др., 2024):

$$K_{\text{CO}_2\text{-экв.}} = [1/(10 * 1.724)] * 3.67 = 0.216,$$

где 10 – коэффициент пересчета центнеров в тонны; 1.724 – коэффициент пересчета гумуса в углерод; 3.67 – коэффициент пересчета углерода в CO_2 -экв. (углеродные единицы).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Величины урожайности ярового и озимого рапса приведены в таблице 1. Урожайность озимого рапса за семилетний период изменялась от 19.8 до 28.1 ц/га и в среднем составляла 25.1 ц/га (табл. 1), Урожайность ярового рапса была значительно меньше и варьировала на протяжении указанного периода от 12.4 до 17.8 ц/га при среднем значении 15.3 ц/га. Оценка значимости различий между величинами урожайностей ярового и озимого рапса методом разности пар по t -критерию составила 2.65. Табличное значение критерия Стьюдента при шести степенях свободы равно 2.45, при двустороннем уровне значимости – 0.05. Это показывает, что

различие между урожайностями ярового и озимого рапса достоверно.

Таблица 1. Средневзвешенная по площади урожайность рапса озимого и ярового в РФ (ц/га) в период 2018–2024 гг. (Росстат, 2025)

Table 1. The area-weighted average yield of winter and spring rapeseed in the Russian Federation (centners per hectare) for the period 2018–2024 (Rosstat, 2025)

Год Культура	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	Среднее за 7 лет
Рапс озимый	19.8	22.6	23.0	26.9	27.7	28.1	27.3	25.1
Рапс яровой	12.4	13.2	16.3	15.1	17.1	17.8	15.1	15.3

По средним за семь лет значениям урожайности озимого и ярового рапса были определены соответствующие значения биомассы гумусообразования (для вариантов сокращенного и расширенного поступления в почву) и баланс гумуса (табл. 2).

При сокращенном варианте поступления в почву биомассы гумусообразования БГ оказывается положительным лишь после выращивания озимого рапса. Меньшая урожайность ярового рапса приводит к снижению биомассы гумусообразования, которая ниже величины минерализации гумуса и к отрицательному БГ. При расширенном варианте поступления биомассы гумусообразования БГ в почве является положительным под всеми культурами рапса.

Повышение содержания гумуса в почвах напрямую коррелирует с расширенным воспроизводством их плодородия. Таким образом, посеvy озимого рапса, независимо от того, сокращено или же расширено поступление биомассы гумусообразования в почву, полностью соответствуют основополагающим принципам регенеративного земледелия. В случае же расширенного поступления такой биомассы, возделывание не только озимого, но и ярового рапса становится целесообразным, приводя к достижению указанных задач. Оценка перспективности использования посевов рапса в почвенно-климатических проектах приведена в таблице 3.

Таблица 2. Биомасса гумусообразования и баланс гумуса в почвах после выращивания рапса

Table 2. Biomass of humus formation and humus balance in soils after rape-seed cultivation

Культура	Средний по площади урожай культур, ц/га	Биомасса гумусообразования, ц/га			Баланс гумуса, ц/га	
		Сокращенный вариант (корни, пожнив-ные остатки)	Побочная продукция	Расширенный вариант (корни, пожнив-ные остатки и побоч-ная продукция)	Сокращенный вариант гумусо-образования	Расширенный вариант гумусо-образования
Рапс озимый	25.1	48.5	75.3	123.8	2.2	17.3
Рапс яровой	15.3	30.5	45.9	76.4	-1.4	7.8

Общее количество эмиссии при сокращенной биомассе гумусообразования под культурами озимого и ярового рапса в РФ было -0.433 млн т CO_2 -экв. В варианте расширенного поступления биомассы гумусообразования в почву после возделывания озимого и ярового рапса отмечалось поглощение углерода $+5.714$ млн т CO_2 -экв. Однако, вследствие различий по посевным площадям рассматриваемых культур, вклад ярового рапса в поглощение углерода почвами РФ был в 1.8 раза больше по сравнению с озимым рапсом. Величина выбросов ПГ (в пересчете на углеродные единицы) сельскохозяйственным сектором экономики РФ в 2022 г. составила 121 млн т CO_2 -экв. (О климатической..., 2025). Поглощение почвой в этом году было 5.714 млн т CO_2 -экв., что составляет около 5% годового выброса углеродных единиц сельскохозяйственным сектором страны.

Таблица 3. Поглощение/эмиссия углеродных единиц почвами под посе-
вами озимого и ярового рапса
Table 3. Absorption/emission of carbon units by soils under winter and spring
rapeseed crops

Культура	Средний урожай культур, ц/га	Количество углеродных единиц (т CO ₂ -экв.), поглощенных (+) или эмитированных (–) почвой на 1 га пашни		Суммарное количество углеродных единиц (млн т CO ₂ -экв.), поглощенных (+) или эмитированных (–) почвой под рапсом в РФ	
		Сокращенное поступление биомассы гумусообразования	Расширенное поступление биомассы гумусообразования	Сокращенное поступление биомассы гумусообразования	Расширенное поступление биомассы гумусообразования
Рапс озимый	25.1	+ 0.48	+ 3.74	+ 0.226	+ 2.025
Рапс яровой	15.3	- 0.30	+ 1.68	- 0.659	+ 3.689
Итого				- 0.433	+ 5.714

ВЫВОДЫ

Средняя за семилетний период (2018–2024 гг.) урожайность озимого рапса была в 1.7 раза выше указанного показателя для ярового рапса. При этом урожайность этих культур значительно различалась по годам исследований.

Следствием различий по урожайности было варьирование БГ. В варианте культуры озимого рапса БГ был положительным, и почва накапливала около 2.2 ц/га гумуса. В варианте яровой куль-

туры рапса БГ был отрицательным, и почвы ежегодно теряли около 1.4 ц/га гумуса.

При расширенном поступлении биомассы гумусообразования в почву БГ был положительным как при выращивании ярового, так и озимого рапса. То есть почвы демонстрировали расширенное воспроизводство плодородия, что соответствует целям регенеративного земледелия.

Таким образом, озимый рапс может использоваться для регенеративного земледелия без ограничений. Культура ярового рапса может использоваться только в варианте расширенного поступления биомассы гумусообразования.

Возделывание озимого рапса приводит к закреплению гумуса в почве, что в пересчете на углеродные единицы составляет +0.48 т CO_2 -экв./га. Возделывание ярового рапса сопровождается потерей гумуса в количестве -0.30 т CO_2 -экв./га. Вследствие 4-кратного превышения посевных площадей ярового рапса над озимой культурой суммарное количество углеродных единиц под посевами рапса в РФ составляет -0.433 млн т CO_2 -экв.

Выращивание озимого и ярового рапса в условиях расширенного поступления биомассы гумусообразования могло бы привести к закреплению в почве +5.714 млн т CO_2 -экв. что составляет около 5% годового выброса углеродных единиц сельскохозяйственным сектором экономики РФ в 2022 г.

Использование озимого рапса для целей развития низкоуглеродной экономики в РФ возможно без ограничений. Применение ярового рапса в этих целях целесообразно только в технологии расширенного поступления биомассы гумусообразования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Артемов, И.В. *Научные основы технологии возделывания и интенсификации производства ярового рапса на семена и кормовые цели в условиях Центрально-Черноземной зоны Российской Федерации*: Дисс. д-ра с.-х. наук, 1992; 84 с.
2. Емельянов, А.Н. *Разработка технологий производства семян рапса ярового в Приморском крае*: Автореферат дисс. канд. с.-х. наук, Благовещенск, 1999; 26 с.
3. Закс, Л. *Статистическое оценивание*; Статистика: Москва, 1976;

598 с.

4. Иванов, А.Л.; Столбовой, В.С.; Гребенников, А.М. Развитие концептуальной основы охраны и рационального использования почв в Европейском Союзе. *Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева* **2022**, (110), 90–113. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2022-110-90-113>.
5. Киреева, Н.С. Рапсовое биотопливо. *Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии* **2008**, (1), 56–57.
6. Крылатов, А.К.; Носов, С.И.; Юдицкий, Б.А.; Бондарев, Б.Е.; Первушина, В.Н. *Динамика баланса гумуса на пахотных землях Российской Федерации*; Госкомзем России; РосНИИземпроект: Москва, 1998; 49 с.
7. Курбанов, С.; Исмаилов, И.; Ниматулаев, Н. Рапс – ценнейшая сельскохозяйственная культура. *Știința agricolă* **2009**, (2), 27–31.
8. Лапа, В.В.; Босак, В.Н.; Дембицкая, Т.В. и др. *Методические указания по учету и применению органических удобрений*; Институт почвоведения и агрохимии; БНИВнФХ в АПК: Минск, 2007; 16 с.
9. Некрасов, Р. К 2030 году сбор масличных культур в России должен вырасти на 46%. <https://easaily.com/ru/news/2024/08/23/k-2030-godu-sbor-maslichnyh-kultur-v-rossii-dolzhen-vyrasti-na-46>.
10. *О климатической повестке России. Первый ежегодный национальный доклад*; Центр “Климатическая политика и экономика России” ИНИП РАН: Москва, 2025; 52 с.
11. Росстат. Таблица в формате Excel; Москва, 2023. https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Val1_2023.xlsx.
12. Столбовой, В.С. Регенеративное земледелие и смягчение изменений климата. *Достижения науки и техники АПК* **2020**, (34), 19–26. <https://doi.org/10.24411/0235-2451-2020-10703>.
13. Столбовой, В.С.; Гребенников, А.М.; Шилов, П.М. Баланс гумуса под основными сельскохозяйственными культурами в России – критерий перехода к регенеративному земледелию. *Достижения науки и техники АПК* **2026**, (40), 5–11. https://doi.org/10.53859/02352451_2026_40_2_5. (In Russ.)
14. Столбовой, В.С.; Гребенников, А.М.; Шилов, П.М.; Духанин, Ю.А. Развитие национальной модели управления бюджетом гумуса (углерода) в почвах агроэкосистем Российской Федерации. *Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева* **2024**, (120), 6–47. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2024-120-6-47>.
15. Столбовой, В.С.; Гребенников, А.М.; Холодов, В.А.; Шилов, П.М.; Духанин, Ю.А. Биомасса гумусообразования в национальной модели управления бюджетом углерода в почвах агроэкосистем. *Бюллетень*

Почвенного института имени В.В. Докучаева **2025**, (125), 138–156.
<https://doi.org/10.19047/0136-1694-2025-125-138-156>.

16. Alexanderson, M.S.; Luke, H.; Lloyd, D.J. Regenerative Farming as Climate Action. *Journal of Environmental Management* **2023**, (347), 119063.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119063>.

17. Natural Resources Conservation Service (NRCS), USDA. Regenerative Pilot Program. <https://www.nrcs.usda.gov/programs-initiatives/regenerative-pilot-program>.

18. Pytlik, M. 5+1 принципов регенеративного сельского хозяйства. Часть 1. <https://www.carboneg.com/blog-ru/principles-of-regenerative-agriculture-1>.

REFERENCES

1. Artemov, I.V. *Scientific Foundations of Cultivation Technology and Intensification of Spring Rapeseed Production for Seeds and Fodder Purposes in the Conditions of the Central Chernozem Zone of the Russian Federation*: Dr. Agric. Sci. Thesis, 1992; 84 p. (In Russ.)
2. Emel'yanov, A.N. *Development of Technologies for the Production of Spring Rapeseed Seeds in the Primorsky Krai*: Extended Abstract of Cand. Agric. Sci. Thesis, Blagoveshchensk, 1999; 26 p. (In Russ.)
3. Zaks, L. *Statistical Assessment*; Statistika: Moscow, 1976; 598 p. (In Russ.)
4. Ivanov, A.L.; Stolbovoy, V.S.; Grebennikov, A.M. Development of the Conceptual Framework for Soil Protection and Management in the European Union. *Dokuchaev Soil Bulletin* **2022**, (110), 90–113.
<https://doi.org/10.19047/0136-1694-2022-110-90-113>. (In Russ.)
5. Kireeva, N.S. Rapeseed Biofuel. *Vestnik of the Ulyanovsk State Agricultural Academy* **2008**, (1), 56–57. (In Russ.)
6. Krylatov, A.K.; Nosov, S.I.; Yuditsky, B.A.; Bondarev, B.E.; Pervushina, V.N. *Dynamics of Humus Balance on Arable Lands of the Russian Federation*; Goskomzem Rossii; RosNII Zempromekt: Moscow, 1998; 49 p. (In Russ.)
7. Kurbanov, S.; Ismailov, I.; Nimatulaev, N. Rapeseed – a Most Valuable Agricultural Crop. *Știința agricolă* **2009**, (2), 27–31. (In Russ.)
8. Lapa, V.V.; Bosak, V.N.; Dembitskaya, T.V. *Methodological Guidelines for Accounting and Application of Organic Fertilizers*; Institute of Soil Science and Agrochemistry; BnIVnFH in the AIK: Minsk, 2007; 16 p. (In Russ.)
9. Nekrasov, R. By 2030, the Harvest of Oilseeds in Russia Is Expected to Increase by 46%. <https://eadaaily.com/ru/news/2024/08/23/k-2030-godu-sbor-maslichnyh-kultur-v-rossii-dolzhen-vyrasti-na-46>. (In Russ.)
10. *On Russia's Climate Agenda. First Annual National Report*; Center “Climate Policy and Economy of Russia”, Institute of Economic Forecasting of the

Russian Academy of Sciences: Moscow, 2025; 52 p. (In Russ.)

11. Rosstat. Excel Spreadsheet; Moscow, 2023.

https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Val1_2023.xlsx. (In Russ.)

12. Stolbovoy, V.S. Regenerative Agriculture and Climate Change Mitigation. *Achievements of Science and Technology of the Agroindustrial Complex* **2020**, (34), 19–26. <https://doi.org/10.24411/0235-2451-2020-10703>. (In Russ.)

13. Stolbovoy, V.S.; Grebennikov, A.M.; Shilov, P.M. Humus Balance under Major Agricultural Crops in Russia as a Criterion for the Transition to Regenerative Agriculture. *Achievements of Science and Technology of the Agroindustrial Complex* **2026**, (40), 5–11. https://doi.org/10.53859/02352451_2026_40_2_5. (In Russ.)

14. Stolbovoy, V.S.; Grebennikov, A.M.; Shilov, P.M.; Dukhanin, Yu.A. Towards a National Model of Humus (Carbon) Budget Management in Soils of Agroecosystems in the Russian Federation. *Dokuchaev Soil Bulletin* **2024**, (120), 6–47. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2024-120-6-47>. (In Russ.)

15. Stolbovoy, V.S.; Grebennikov, A.M.; Kholodov, V.A.; Shilov, P.M.; Dukhanin, Yu.A. Biomass of Humus Formation in the National Model of Carbon Budget Management in Soils of Agroecosystems. *Dokuchaev Soil Bulletin* **2025**, (125), 138–156. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2025-125-138-156>. (In Russ.)

16. Natural Resources Conservation Service (NRCS), USDA. Regenerative Pilot Program. <https://www.nrcs.usda.gov/programs-initiatives/regenerative-pilot-program>.

17. Alexanderson, M.S.; Luke, H.; Lloyd, D.J. Regenerative Farming as Climate Action. *Journal of Environmental Management* **2023**, (347), 119063. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119063>.

18. Pytlik, M. 5+1 Principles of Regenerative Agriculture. Part 1. <https://www.carboneg.com/blog-ru/principles-of-regenerative-agriculture-1>. (In Russ.)

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2026-129-43-83



Ссылки для цитирования:

Абросимов К.Н. Томография почв: методические рекомендации и требования к подготовке и съемке монолитов и микромонолитов // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2026. Вып. 129. С. 43-83. DOI: 10.19047/0136-1694-2026-129-43-83

Cite this article as:

Abrosimov K.N., Soil tomography: methodological recommendations and requirements for preparation and surveying of monoliths and micromonoliths, Dokuchaev Soil Bulletin, 2026, V. 129, pp. 43-83, DOI: 10.19047/0136-1694-2026-129-43-83

Благодарность.

Особая благодарность Скворцовой Е.Б. и Хохлову С.Ф. за фотографии отбора проб, Мусаэлян Р.Э. и Коросту Д.В. за помощь в изготовлении предметных столиков для почвенных образцов. Статья подготовлена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 23-74-00069 “Связь нано- и микроструктурных особенностей строения почв: от репрезентативности к многомасштабной цифровой модели.

Вклад авторов. Абросимов К.Н. – концептуализация, методология, проведение исследования, создание рукописи и ее редактирование, визуализация.

Заявление о конфликте интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Заявление об использовании технологий искусственного интеллекта. При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовались.

Заявление о доступности данных.

Все данные, полученные в ходе этого исследования, включены в опубликованную статью.

Acknowledgments.

Special gratitude is expressed to E.B. Skvortsova and S.F. Khokhlov for photographs of the sampling process, and to R.E. Musaelyan and D.V. Korost for their assistance in fabricating specimen stages for soil samples. This article was prepared with financial support from the Russian Science Foundation (RSF), project No. 23-74-00069, “Relationship between nano- and microstruc-

tural features of soil architecture: from representativeness to a multiscale digital model”.

Authors' contributions. Abrosimov K.N. – conceptualization, methodology, conducting the research, manuscript preparation and editing, visualization.

Conflicts of interest. The author declares no conflicts of interest.

Statement on the use of artificial intelligence technologies.

No generative artificial intelligence technologies were used in the creation of this article.

Data availability.

All data obtained during this study are included in the published article.

Томография почв: методические рекомендации и требования к подготовке и съемке монолитов и микромонолитов

© 2026 г. К. Н. Абросимов

ФИЦ “Почвенный институт им. В.В. Докучаева”, Россия,
119017, Москва, Пыжевский пер, 7, стр. 2,
<https://orcid.org/0000-0002-3552-8054>, e-mail: abrosimov_kn@esoil.ru.

Поступила в редакцию 28.07.2025, после доработки 22.09.2025,
принята к публикации 21.08.2026

Резюме: В данной статье рассматриваются методологические аспекты начальных этапов томографического исследования почв: от подготовки образцов до получения томографических проекций. Опираясь на знания о процессах ослабления рентгеновского излучения в почве, принципах компьютерной томографии и собственный опыт, автор определяет (и предоставляет в табличном виде) оптимальные размеры почвенных образцов, соответствующие конкретным исследовательским задачам, для двух томографических систем: SkyScan 1172 и Neoscan N80. Для этих систем предоставлены и обоснованы оптимальные параметры сканирования (с описанием их функций, численных значений и их влияния на результаты). На основе практического опыта автора в статье анализируются методологические ошибки, связанные с отбором образцов и использованием неподходящих материалов для их упаковки и сканирования; при этом демонстрируются последствия подобных ошибок и предлагаются способы их предотвращения.

Ключевые слова: томографическая съемка; СТ; mCT; подготовка образцов; томографическое исследование; отбор образцов почвы для СТ.

Soil tomography: methodological recommendations and requirements for preparation and surveying of monoliths and micromonoliths

© 2026 K. N. Abrosimov

*Federal Research Centre "V.V. Dokuchaev Soil Science Institute",
7 Bld. 2 Pyzhevskiy per., Moscow 119017, Russian Federation,
<https://orcid.org/0000-0002-3552-8054>, e-mail: abrosimov_kn@esoil.ru.*

Received 28.07.2025, Revised 22.09.2025, Accepted 21.08.2026

Abstract: This article focuses on the methodological aspects of the initial stages of soil tomographic analysis, ranging from sample preparation to the acquisition of tomographic projections. Drawing on knowledge of soil X-ray attenuation, the principles of tomography, and the author's own experience, the study defines – and presents in tabular form – optimal soil sample dimensions tailored to specific research objectives for two tomographic systems: the SkyScan 1172 and the Neoscan N80. Additionally, optimal scanning parameters (including functions, values, and their impact on results) are presented and justified for these systems. Based on the author's experience, the article examines methodological errors related to sample collection and the use of unsuitable materials for packaging and scanning, illustrating the consequences of such errors and outlining ways to avoid them.

Keywords: tomographic scanning; CT; mCT; sample preparation; tomographic examination; soil sampling for CT.

ВВЕДЕНИЕ

Компьютерная томография для исследования структуры почвы и порового пространства применяется с начала 80-х годов XX в. За прошедшее время проведены тысячи исследований и опубликовано множество статей и монографий по самым разным задачам почвоведения, доступных для изучения методом томографии. Но при этом в значительной части исследований методике отбора образцов и томографической съемке уделяется совсем немного внимания, при том, что именно эти два этапа являются определяющими для результатов всего исследования. Плохую сегментацию порового пространства, ошибочную объемную модель или результаты анализа можно переделать. Реконструкцию объемной структуры можно сделать с иными параметрами под

другую задачу. Но плохо снятый образец почвы придется переснимать заново, растрачивая моторесурс томографа. Как и плохо отобранный образец придется отбирать заново в поле, если это возможно. Одна из целей этой статьи – **сформулировать круг задач, для решения которых используется компьютерная томография (КТ), определить габариты образцов, для этого необходимых.**

Наиболее часто в исследованиях встречается образцы почвы в форме цилиндра совершенно разных размеров. При этом специально подготовленные и упакованные (Perret, 1998; Корост, 2012; Pfeifer, 2015; Шеин, 2017; Miyoshi, 2021 и др.). Образцы для томографического исследования по своему диаметру (около 10 см) сопоставимы с шириной почвенного монолита, так что термин “монолит” обрел новый смысл и часто упоминается в томографических статьях именно в контексте монолита для томографии, а его уменьшенная версия в шприцах или мелких трубках стала называться микромонолитами (Абросимов, 2022).

Единых стандартизированных требований к подготовке и оформлению почвенного образца для томографического исследования не существует. Сложно найти даже методические рекомендации в формате “что будет если сделать так...”. Отсюда вторая цель – **дать подробное описание правильному способу подготовки образцов для КТ-исследования. От полевого отбора до помещения в томограф.**

С методической литературой по настройкам томографической съемки почв примерно та же ситуация что и с пробоотбором – обрывочная информация или перечисление параметров применительно к конкретному образцу без пояснения почему именно так правильно. Или просто слепое копировании записей лог-файла. Томографы для исследования почв используются самые разные – в диапазоне от лабораторных настольных до анализаторов зерна и дефектоскопов с грубым разрешением и очень мощной рентгеновской трубкой. Концепция томографии – съемка рентгенограмм через определенный угловой шаг определяет примерно одинаковые настройки для томографов вне зависимости от их специального назначения, но с разными значениями. В зависимости от модели доступ к настройкам у оператора может быть не-

полным, возможна частичная автоматизация. Или настройки не полностью прописываются в лог-файл с отснятными данными, что может быть причиной непопадания этой информации в научные статьи. С учетом литературных данных и опыта эксплуатации автор двух томографов Почвенного института – Bruker SkyScan 1172 и Neoscan N80, а также некоторого опыта работы с результатами съемок систем PKT-180, Skyscan 1174, 1173 и данными медицинской томографии определена третья цель – **сформировать список базовых настроек томографической съемки с описанием их функционала и некоторыми результатами их применения.**

ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ В ПОЧВОВЕДЕНИИ

Компьютерная томография – метод неразрушающего контроля, позволяющий изучить внутреннюю структуру исследуемого объекта, оцифровать ее при разрешении томографической съемки, обработать методами анализа изображений с возможностью получить ряд морфометрических показателей и визуализировать в объеме отдельные рентген-контрастные фазы, а также промоделировать процессы (например, фильтрацию жидкости или газов).

Начало активного применения компьютерной томографии связано с изобретениями американского физика Алана Кормака и английского инженера-физика Годри Хаунсфилда из компании EMI Ltd. Первый решил задачу томографического восстановления – получения поперечных плотностных рентгеновских срезов из набора теневых рентгеновских проекций (Cormack, 1963, 1964). Хаунсфилд сконструировал первый компьютерный рентгеновский томограф, клинические испытания которого прошли в 1972 г. (Hounsfield, 1973).

Со временем томографы разделились по назначению – медицинские томографы, томографы-дефектоскопы, лабораторные микро- и нанотомографы, томографы-анализаторы кернов и др. Специализированных томографов для изучения почв не существует, но большинство из существующих классов томографов для таких исследований пригодны.

Помимо назначения существует градация и по разрешающей способности. Томографы, способные делать съемку с пространственным разрешением до 1 мкм, относят к классу микротомографов. Способные снимать более детально (до 100 нм и более у моделей Bruker Skyscan 2011, 2214) – к нанотомографам (Stock, 2009).

Первые опыты съемки почв в 80-е годы проводились на медицинских томографах. Тогда же определилась наиболее удобная для исследования форма монолита – цилиндр. Такая форма равномерно просвечивается, а толщина около 10 см в диаметре примерно сопоставима по поглощению с человеческим телом, и такой образец на томографе можно снимать с пресетом (комплексом базовых настроек) для “человека целиком”. В качестве дешевой рентген-прозрачной упаковки почти сразу стали использовать полипропиленовые трубы 110–160 мм, доступные в любом строительном магазине. Этот опыт повсеместно применяется и сейчас.

Томография почв развивалась следом за совершенствованием томографической техники по пути увеличения пространственного разрешения и возможности изучения новых типов образцов. С появлением настольных томографических систем типа SkyScan 1072 в 90-е годы XX в. возможности исследования структуры почв с высоким разрешением значительно возросли. Стало возможным исследовать образцы на микроуровне структурной организации в масштабе отдельных тонких горизонтов или агрегатов. Тогда же было отработано большинство из известных сейчас способов подготовки препарата для томографического исследования. Настройки съемки, как правило, использовались исходя из рекомендаций производителя томографов. По опыту мировых томографических исследований можно утверждать, что почва – один самых тяжелых объектов для компьютерной томографии. Высокое рентгеновское поглощение – на уровне горных пород, но при этом очень непрочная структура, подверженность изменениям структуры при изменении влажности, наличие живой и мертвой органики, минеральных включений или железистых конкреций – все это осложняющие факторы для томографического исследования. Иногда почву просто сложно качественно отобрать для исследования.

ОБЩИЕ ОСОБЕННОСТИ ОБРАЗЦА ПОЧВЫ ДЛЯ ТОМОГРАФИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Форма и габариты образца для томографического исследования определяются двумя основными критериями: задача, для решения которой делается томография почв, и технические параметры рентгеновского томографа, выбранного для томографического исследования.

Решение исследовать макропористость на микротомографе будет неудачным выбором – большинство этих томографов оборудованы слабыми рентгеновскими трубками мощностью до 10 ватт. Этого достаточно для того, чтобы просветить 2 см почвы с приемлемым результатом, или 5 см, но с очень грубым; 16–20 ватт уже достаточно для хорошего результата съемки 5 см образца и грубого результата для 8–10 см. Так же в микротомографах жесткие требования по высоте монолита (микромонолита), обычно не больше нескольких сантиметров. Для анализатора кернов длина образца измеряется погонными метрами, а мощность рентгеновской трубки до 400 W, следствием чего является очень высокая скорость съемки.

Сделать группировку типоразмеров образцов почвы для томографического исследования можно по литературным источникам, исходя из задач и объектов исследования. Чаще всего томография почв применяется для:

1) Исследования развития корневых систем (ризосферы) и их влияния на структуру почв или почвогрунтов (Lontoc-Roy, 2005; Lucas, 2019; Chirol, 2021; Nagayama, 2025 и др.). Для этих задач чаще всего использовались крупные образцы в форме цилиндра диаметром 5–15 см и высотой до 20 см. Для съемки используются макротомографы, но в последние годы стали встречаться работы с использованием мощных лабораторных томографических систем. Иногда публикуются исследования, основанные на съемке образцов меньшего диаметра – 1–2 см, но при этом сами авторы исследований отмечают серьезные недостатки такого способа, в частности маленькую область развития корневой системы (Шеин, 2021; Суздалева, 2022 и др.).

2) Исследование морфологии и функций порового простран-

ства (Perret, 1998; Mooney, 2002; Rabot, 2018; Schlueter, 2020; Li Q, 2024 и др.). Метод компьютерной томографии подходит как для исследования порового пространства на микроуровне структурной организации с детализацией свыше 1 мкм, так и на макроуровне с детальностью грубее 75 мкм. При микроструктурном исследовании существует ограничение на размер образца – большинство существующих томографов не смогут отснять монолит или частицу почвы диаметром 2–3 мм детальнее разрешения 1 мкм. Для разрешения 4–5 мкм уже станет доступным диаметр образца 1.5–2 см. Для макроуровня фактическое ограничение – 10 см в диаметре (с максимальной детальностью до 37.5 мкм на томографе Neoscan N80 или от 70–100 мкм на любом анализаторе кернов). Промышленные дефектоскопы способны просветить монолит почвы и большего диаметра. Известны исследования таких монолитов диаметром 15 см и более (Kang и др., 2024).

3) Исследование изменений в структуре твердой фазы и порового пространства в результате физических процессов – набухания-усадки или замерзания-оттаивания (Skvortsova, 2020; Wang 2020; Fomin, 2023; Li, 2024 и др.). Как правило, в таких исследованиях используется серийная съемка одного и того же образца несколько раз, иначе называемая 4D-томографией. Съемка в мерзлом состоянии пока что доступна при использовании столиков-термостатов для некоторых моделей томографов Bruker SkyScan 1172, 1272, 1073, 1273 и 1275 и Neoscan N80, N70, N60. Для этих столиков размер образца почвы сильно ограничен. В столик от Bruker помещается образец диаметром до 1 см и высотой 1.5–2 см. При таких габаритах доступна съемка при стабильной температуре не менее -5°C (при максимальном промерзании -20°C для образца размером на порядок меньше). Разрешение съемки в столике будет грубее чем без его использования для образцов одинакового диаметра из-за внешней рентген-прозрачной крышки, которая не позволит приблизить образец к источнику излучения на близкое расстояние. Похожие ограничения по габаритам и температуре действительны и для термостата от Neoscan, но при этом температура образца таких габаритов будет ниже за счет более высокой мощности охлаждающего устройства.

4) Исследование изменений почвенной структуры при разной

антропогенной нагрузке (Gorbov et al., 2022) или обработке (Pöhlitz, 2018 и др.). Такие исследования по размерам и форме образцов идентичны исследованиям порового пространства.

5) Исследование изменений структуры и порового пространства при внесении удобрений. Для этого используются в основном крупные монолиты (диаметром 5–10 см.) (Yu, 2018; Wang, 2020 и др.).

Задачи определяют выбор рентгеновского томографа для образца почвы. Нет никакого смысла использовать анализатор кернов для исследования микроструктуры или наоборот микро-томограф для исследования макропор. Однако для разных задач многие образцы имеют схожие габариты. Лимитирующим фактором становится высота монолита. Те же 10 см почвы в диаметре и 15 см по высоте можно исследовать как на анализаторе кернов (быстро, но грубо), так и на лабораторных томографах Neoscan N70, N80, Skyscan 1273 (дольше, чем на анализаторе керна, но намного детальнее).

Томографы объединяет реализация технической концепции томографии, где образец снимается на просвет, с фиксированным угловым шагом, по определенной траектории и с определенным количеством снимков на каждой точке углового шага. Конечный этап съемки – создание качественного стека теневых проекций для последующей реконструкции объемной структуры при разрешении съемки. Это определяет ряд параметров для самого образца:

1) Цилиндрическая форма. Нужна для равномерного просвечивания и минимальных перепадов поглощения рентгеновского излучения. Чем сложнее и неравномерное по длине и ширине форма образца – тем выше вероятность артефактов и ошибок при реконструкции томографических данных.

2) Рентгеновское поглощение около 60% при базовых настройках томографа. Это определит детализацию изображения и адекватное соотношение сигнал/шум. При поглощении более 90% излучения и невозможности компенсировать увеличением времени экспозиции уровень шумов будет крайне высоким, сильно влияющим на детализацию изображения. Подобное возможно, если попытаться снять образец почвы плотного сложения (горизонт

ВС, например) диаметром 4–5 см на томографе типа SkyScan 1172. Технически любой плотный образец почвы снять можно, но с крайне плохой детализацией и в течение длительного времени (20 часов и более), что нерационально. Тот же образец на более мощном томографе типа Neoscan N80 может быть снят при сопоставимом разрешении и с намного более хорошим качеством результата за 40–50 минут. За счет более мощного рентгеновского источника.

3) Точка крепления по геометрическому центру образца (рис. 1). В абсолютном большинстве микротомографов образец вращается, а детектор и источник излучения неподвижны (кроме медицинских). Есть исключения в виде анализаторов керна горизонтальной ориентации, где образец лежит на боку и перемещается вперед-назад по направляющим или специализированных микротомографов под биологические объекты типа Bruker SkyScan 1176. Почву на таком томографе тоже снимать возможно, но образец придется адаптировать под форму лотка. Точка крепления в центре поможет при центровке образца, чтобы при съемке образец вращался вокруг своей центральной оси, а не “летал по орбите”. Съемка получится в обоих случаях, но во втором варианте придется пожертвовать разрешением (в сторону его огрубления) и установить более частый угловой шаг, что значительно удлинит время съемки и увеличит объем данных. Для монолитов, не имеющих точки крепления, придется изготовить рентген-прозрачные адаптеры или подставки. Для этого можно использовать медицинские шприцы большего диаметра или 3d печать.

4) Исключить влияние вибрации и динамических нагрузок в процессе съемки. Образец почвы не должен шевелиться или перемещаться в процессе съемки. Крепежный материал должен обеспечивать устойчивость образца в ходе всего эксперимента. При работе с насыщенными образцами рекомендуется помещать их в герметичные колбы, при необходимости заполненные водой (Корост, 2012). Это необходимое условие, в противном случае результат такой съемки просто не может быть реконструирован.

5) Если почва не высушена, то перед съемкой такой образец следует загерметизировать рентген-прозрачными материалами – пищевой пленкой или скотчем (неармированным). Это не остано-

вит процесс высыхания почвы в условиях помещения, но очень сильно его замедлит. Этого достаточно для того, чтобы изменения структуры не повлияли на результат съемки.

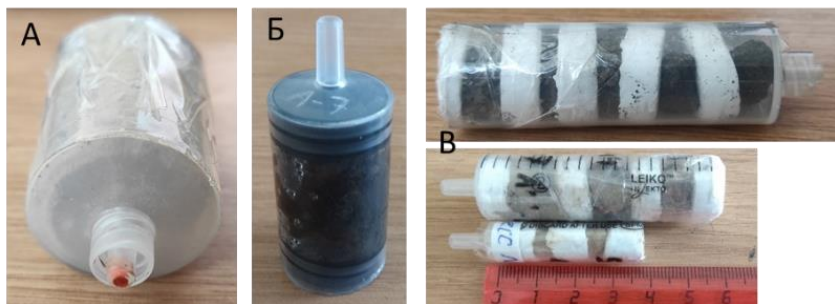


Рис. 1. Варианты готовых почвенных образцов для томографического исследования: **А)** Микромонолит, $D = 3$ см, герметизированный пластилином и скотчем (Shein, 2016; Gorbov et al., 2022). **Б)** Микромонолит $D = 2$ см, герметизированный двумя резиновыми шомполами (самый надежный вариант для сохранения влажности. Остается влажным в течение нескольких лет) (Шоркунов и др., 2018). **В)** Воздушно-сухие агрегаты с прослойкой из пенопласта в шприцах разного диаметра (Абросимов, 2023).

Fig. 1. Types of prepared soil samples for tomographic analysis: **A)** Micromonolith, $D = 3$ cm, sealed with modeling clay and adhesive tape (Shein, 2016; Gorbov et al., 2022). **Б)** Micromonolith, $D = 2$ cm, sealed with two rubber stoppers (the most reliable option for moisture retention; remains moist for several years) (Shorkunov et al., 2018). **В)** Air-dry aggregates with a foam spacer in syringes of various diameters (Abrosimov, 2023).

ПОДГОТОВКА И УПАКОВКА ОБРАЗЦОВ ПОЧВЫ

Для возможности получения качественных результатов съемки образец почвы должен соответствовать перечисленным выше параметрам: быть рентген-прозрачным, близким по форме к цилиндру или сфере, герметичным, неподвижным в пределах упаковки и с возможностью прочного крепления в томографе (рис. 2).



Рис. 2. Микромонологит в процессе отбора вручную. Прикопка, обрезка колонны почвы под диаметр шприца 50 мл (Gorbov et al., 2022). При таком способе отбора опасность представляет быстрое высыхание почвы. Микромонологит может стать меньше диаметра шприца и потерять устойчивость. Края начнут фрагментироваться и осыпаться. Почву после обрезки колонны потребуется подпереть комком из скотча или пленки при герметизации.

Fig. 2. Micromonolith during manual sampling: excavating and trimming the soil column to fit the diameter of a 50-mL syringe (Gorbov et al., 2022). Rapid soil drying poses a risk with this sampling method; the micromonolith may shrink to a diameter smaller than that of the syringe and lose stability, causing the edges to fragment and crumble. After trimming the column, the soil will need to be supported with a wad of adhesive tape or plastic film during sealing.

Для монолитов диаметром 10 см и длиной более 10 см крепление не обязательно, т. к. снимаются они горизонтально. Но при этом их отбор значительно сложнее и дольше по времени (рис. 3).

Для качественного образца почвы для КТ-исследования требуется:

1) Правильный отбор пробы (препарата, образца). Почвенный монолит (микромонологит) отбирается вертикально путем вырезания (или выкапывания) колонны почвы и надвига на нее упаковочного материала (трубы или шприца) (рис. 2, 3).



Рис. 3. Организация отбора монолита $D = 10$ см, $L = 50$ см для томографического исследования. Окапывание вертикальной колонны почвы с последующей обрезкой по периметру и надвигом полипропиленовой трубы. Опасность представляет возможность перелома столба почвы в процессе отбора. Особенно если отбор ведется с небольшим наклоном (фотографии Хохлова С.Ф. и Скворцовой Е.Б.).

Fig. 3. Procedure for collecting a soil monolith ($D = 10$ cm, $L = 50$ cm) for tomographic analysis. Excavation of a vertical soil column, followed by trimming around the perimeter and sliding a polypropylene pipe over it. There is a risk of the soil column breaking during collection, especially if the sampling is performed at a slight angle. (Photos by S.F. Khokhlov and E.B. Skvortsova).

Обрезка монолита или микромонолита тонким ножом (идеально подойдет монтажный или канцелярский нож с тонкими сменными лезвиями) с последующей упаковкой в пластиковую трубу, шприц или колбу. Вдавливатель почву в трубу, забивать трубу в почву молотком или чем-то еще категорически недопустимо в большинстве случаев. Это практически сразу приводит к деформации трубы до овальной формы, растрескиванию почвы и серьезным повреждениям внутренней структуры (рис. 4).

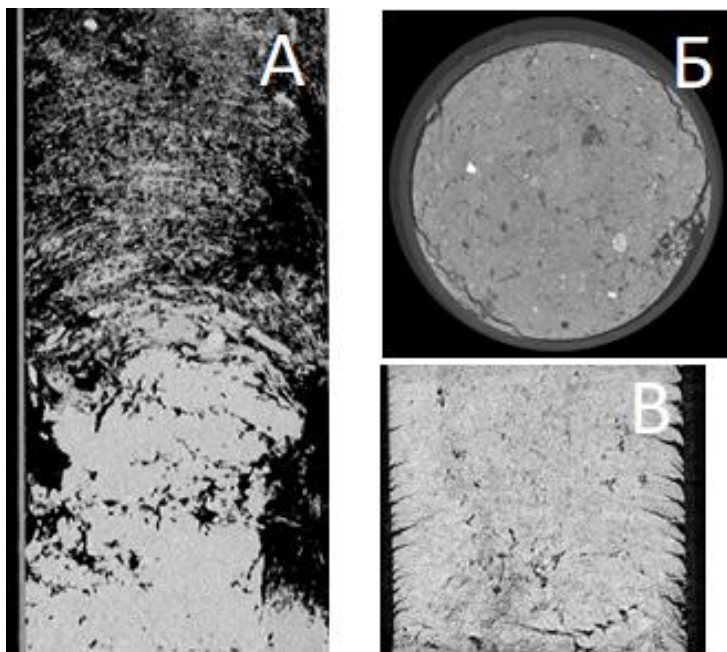


Рис. 4. Последствия неправильного пробоотбора: искажение внутренней структуры в результате забивания трубы в почву. Торфяные слои (А) выгибаются, суглинистые трескаются поперек монолита на разную глубину от края (Б–В).

Fig. 4. Consequences of improper sampling: distortion of the internal structure resulting from driving the tube into the soil. Peat layers (A) bulge, while loamy layers crack across the monolith to varying depths from the edge (B–B).

Если труба в процессе вдавливания натолкнется на древесный корень – то не сможет его разрезать, а корень вытянет за собой часть почвенного материала. В итоге произойдет еще большая деформация образца. Томографическое исследование подобных образцов не имеет смысла. Вдавливать трубу в почву можно только на незначительную глубину – до 5 см по глубине в условиях очень рыхлой и пористой почвы. Следует отметить, что существуют отборники проб, где труба в почву именно забивается на небольшую глубину, такие как Bulk Density Soil Sampling Kit Compact Slide Hammer (AWS, USA). Устройство позволяет отобрать микромонолит диаметром около 5 см и аналогичной высоты. При этом явных повреждений структуры нет. В данных устройствах используется прозрачная (акриловая или поликарбонатная) труба, сцепление с которой даже у мокрой суглинистой почвы минимально.

2) Использование только рентген-прозрачных материалов для упаковки и крепежа, не дающих засвета, артефактов, или иным способом влияющих на качество данных. Крепежный материал должен быть максимально прозрачен для рентгеновских лучей (Корост, 2012). Для упаковки почвы идеально подходят полипропиленовые трубы любого диаметра (серые или оранжевые), каналы для вентиляции (ПВХ), пластиковые круглые кабель-каналы, прозрачные трубы из оргстекла (поликарбонат или акрил), медицинские одноразовые шприцы (из ПВХ) с центральным носиком как на рисунках 1 и 2. В качестве герметизации влажных образцов от высыхания идеально подходит тонкая пищевая пленка, прозрачный скотч (армированный или металлизированный использовать нежелательно), пластилин или стоматологический воск. Зафиксировать почву в упаковке от разбалтывания можно клиньями из пенопласта. Еще хороший вариант для герметизации микромонолита на основе шприца – черная резина от поршня.

Материалы, которые использовать не рекомендуется: поролон, изолента всех видов, любые металлические трубы (вне зависимости от толщины стенки) или фольга, резина, вспененный (толстый) двусторонний скотч. Обычно в комплекте томографа поставляются различные подставки и крепежи для образцов. Использовать их следует с осторожностью, особенно металлические.

8 см монолит, поставленный на латунную тарелку, будет частично засвечен на высоту около 1–1.5 см от края тарелки (по опыту использования Neoscan N80).

3) Правильная ориентация и подпись образца. Пространственная ориентация указывается стрелкой на упаковке “верх – низ” (желательно использовать перманентный несмываемый маркер для надписей, а потом надпись дополнительно заклеить прозрачным скотчем). Горизонтальную ориентацию также можно отметить тонкой медной проволокой по внешней границе монолита (без ее контакта с почвой, просто примотать скотчем к упаковке). Также необходимо указать разборчиво номер образца или его название согласно ведомости.

4) При транспортировке и хранении избегать отрицательных температур (при условии, что сама почва не мерзлая изначально). Почва – не горная порода. Цикл заморозания-оттаивания значительно изменит структуру почвы (Skvortsova et al., 2020).

5) Составить ведомость образцов. Обязательно должна включать в себя: нумерацию и названия образцов, название почвы по одной из используемых классификаций, глубину пробы, название горизонта, GPS-координаты разреза и его краткое описание.

УСТАНОВКА ОБРАЗЦА ПОЧВЫ В ТОМОГРАФ

Для большинства томографов (микротомографов) характерно вертикальное расположение образца на предметном столике, на котором, скорее всего, одна точка крепления – или цанговый зажим (Bruker Skyscan), или короткая трубка с прижимным винтом (Neoscan). Фирменных креплений, столиков или подставок часто недостаточно или они несовместимы с почвенными образцами. Установка шприцев как способа упаковки препарата для томографического исследования вообще ни одним из производителей не предполагается. Единственное решение – самостоятельное изготовление крепежа для образцов нужного типа. На рисунке 5 показаны различные самодельные крепления для почвенных образцов, используемые для Neoscan N80. Часть из них совместимы с цанговым зажимом SkyScan 1172 (цанга и винтовой зажим Neoscan отличаются по диаметру на 0.3 мм).

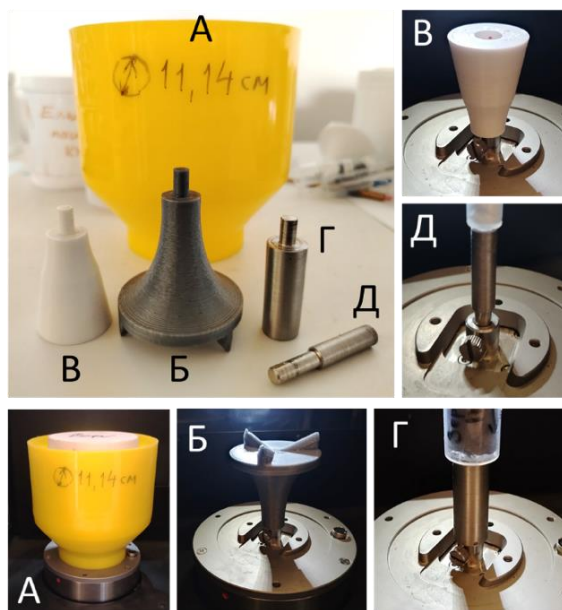


Рис. 5. Различные самодельные варианты крепежа к предметному столику томографа Neoscan N80. **А)** Пластиковая муфта под монолиты диаметром 8–10 см и высотой не более 10 см. **Б)** Напечатанный крепеж под 4–5-сантиметровые микромонолиты (цилиндр образца без изначальной точки крепежа ставится на 3 опорные точки – ребра на поверхности крепежа. Выравнивается по горизонтали вручную). **В)** Напечатанный переходник-крепеж для образцов в крупных шприцах 100–150 мл. **Г)** Фрезерованный переходник для шприцев с креплением Luer-lock (рис. 2) совместим и со шприцами объемом 150 мл с длинным носиком. **Д)** Фрезерованный крепеж для мелких шприцев с обычным креплением иглы.

Fig. 5. Various custom-made mounting options for the Neoscan N80 tomograph sample stage. **A)** Plastic sleeve for monoliths with a diameter of 8–10 cm and a height of no more than 10 cm. **Б)** 3D-printed mount for 4–5 cm micromonoliths (the cylindrical sample, lacking a dedicated mounting point, rests on three support points – ribs on the mount's surface – and is leveled manually). **В)** 3D-printed adapter for samples in large (100–150 ml) syringes. **Г)** Machined adapter for Luer-lock syringes (Fig. 2). Also compatible with 150 ml syringes featuring a long nozzle. **Д)** Machined mount for small syringes with a standard needle attachment.

Для самодельного крепежа нужно соблюсти ряд условий:

1) Прочность конструкции. Точки крепления к томографу и образцу должны быть прочными, способными выдержать небольшие циркулярные нагрузки (шаговый сдвиг при съемке) и горизонтальные (на сдвиг и излом, при смещении столика к камере или рентгеновской трубке при выборе разрешения съемки). Образец почвы должен быть неподвижен в своей упаковке в процессе съемки.

2) Рентген-прозрачный материал при условии плотного контакта с почвой, или любой другой, если есть прослойка в 3 мм и более, и если крепеж не затеняет почвенный образец при съемке.

3) Центральная ось крепежа должна совпадать с осью вращения предметного столика.

Для изготовления можно использовать как 3D печать (рис. 5Б, 5В), так и токарно-фрезерное оборудование (рис. 5Г, 5Д). Фрезерованный крепеж надежнее напечатанного и дольше может эксплуатироваться. Шприцы различных производителей могут незначительно различаться. Стандартно только крепление для иглы у шприцев 5–50 мл. Между креплениями у шприцев 100 и 150 мл (большой носик) есть разница по диаметру и форме. Для образцов в такой упаковке понадобится разный крепеж в томографе, или доработанный до совместимости с обоими вариантами. Иногда есть необходимость дополнительно использовать крепежный материал для жесткой фиксации. В большинстве своем материалы те же, что и при изготовлении упаковки для образца. Но при этом в качестве подложки или дополнительной точки опоры крайне нежелательно использовать пластилин или вспененный двусторонний скотч. Воск (без ароматических добавок) хорошо заменяет пластилин и менее подвержен температурному расширению.

ВЫБОР ОБЛАСТИ СКАНИРОВАНИЯ

После установки образца в томограф нужно убедиться в его центральном положении. Для этого в режиме live view достаточно визуально сравнить отображаемые теневые проекции в стартовом положении и при повороте на 90°. Таким образом выявляется

наклонное положение образца или расположение столика со сдвигом.

Следующий шаг – определение границ по высоте, внутри которых съемка будет осуществляться (расширенная область сканирования). Для каждой модели это делается согласно прилагаемой инструкции. Если этого не сделать – съемка будет происходить в пределах поля зрения камеры томографа (для томографов SkyScan и Neoscan).

Для почвенных монолитов и микромонолитов есть особенность подготовки образца – неровная верхняя и нижняя граница, иногда обрезанная под конус или отломанная. При съемке монолита интерес представляет его центральная область, удаленная от края и с наименьшей вероятностью подверженная изменениям при отборе образца. Не всегда нужно снимать образец целиком, иногда достаточно выбрать отдельную область для съемки. Верхнюю и нижнюю границы снимаемой области можно точно установить визуально или по отображаемому значению в меню настроек. Боковые границы удобнее всего выставлять по границам упаковки монолита (стенкам трубы или шприца), но иногда доступна возможность съемки области внутри монолита, когда сам монолит будет больше поля зрения. Такой режим съемки потребует реконструкции в режиме “объект больше поля зрения камеры” (для ПО nRecon) а изображение может быть со значительно большим количеством цифровых шумов, чем для образца аналогичного диаметра, но без дополнительного поглощения от почвы, не попадающей в снимаемую область.

ТОМОГРАФИЧЕСКАЯ СЪЕМКА ПОЧВ. БАЗОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ

Томографическая съемка – единственный этап томографического исследования, где непосредственно задействован томограф. Ее результатом становится стек (набор) теневых проекций (рентгенограмм), снятых через фиксированный угловой шаг.

Яркость (диапазон различных градаций серого) на рентгеновской теневой проекции отражает ослабление рентгеновского излучения за счет эффектов рассеивания и поглощения сигнала, прошедшего через образец. Ослабление будет зависеть от плотно-

сти и эффективного атомного номера (Z -ЭФ), из которого состоит изучаемый объект. Описывается этот эффект законом Ламберта-Бера, определяющим ослабление монохроматического пучка света при распространении его в поглощающей среде (Rontgen, 1898). Закон выражается формулой:

$$I(x) = I_0 e^{(-\mu x)}, \quad (1)$$

где I_0 – начальная интенсивность рентгеновского излучения; x – толщина слоя вещества, через которое проходит излучение; μ – показатель поглощения среды (Cullity, 2001).

В случае, когда сканируемый объект не гомогенен по своему составу, а таковы практически все горные породы, то уравнение (1) приобретает вид:

$$I(x) = I_0 e^{(-\sum_i \mu_i x_i)}, \quad (2)$$

где каждому инкременту i соответствует отдельный материал с определенным показателем поглощения μ^i и линейной длиной x^i .

При прохождении рентгеновского излучения через какой-либо материал уровень поглощения излучения может быть сопряжен с четырьмя видами взаимодействия (Halmshaw, 1991):

- Фотоэлектрическим поглощением.
- Комптоновским рассеянием.
- Образованием электрон-позитронных пар.
- Когерентным рассеянием Релея.

В случае с изучением почв, когда применяются источники излучения с энергией до 100 кэВ, основным процессом, определяющим ослабление рентгеновского излучения, будет фотоэлектрическое поглощение (Корост, 2012).

Если образец почвы просвечивается на превью в нескольких ракурсах, то можно приступать к подготовке съемки. Перед параметрами съемки есть важный этап – центровка образца и его фиксация. Для возможности выставить наиболее детальное разрешение и получить снимки с максимальным качеством образец нужно расположить прямо по центру оси вращения при съемке. А желательно вообще совместить центральную ось цилиндра монолита

почвы с осью вращения крепежа в томографе. Простой способ центровки – вручную добиться прямого расположения монолита с равным расстоянием от края поля зрения камеры, а после проверки его на 90° и снова выправить монолит.

Для массивных и крупных образцов, 5–10 см диаметром, точная центровка не столь важна, но для маленьких, менее 1 см, – просто необходима. Для коррекции центрального расположения в большинстве томографов реализован режим автоподстройки оси вращения. Для максимальной точности можно использовать микропозиционные устройства типа отдельных модулей-приставок для систем Bruker Skyscan или встроенных в сам томограф (Neoscan). Также в процессе съемки образец должен быть прочно закреплён и неподвижен. Частицы почвы не должны перемещаться при съемке внутри упаковки или тем более высыпаться наружу.

Если объект исследования правильно подготовлен для съемки, надежно зафиксирован, и его рентген-проницаемость находится в пределах нормы (поглощение от 40%, до 80–90%) на используемом томографе, то необходимо выставить ряд настроек съемки или использовать готовые протоколы или пресеты.

Настройки съемки практически идентичны для большинства томографов, но их значения и доступность для изменения могут существенно различаться в зависимости от типа томографа, модели и др. Базовыми параметрами являются:

1) Энергия съемки (Энергия рентгеновской трубки, Source Voltage). Основной параметр, влияющий на контрастность томографических данных, зависит от модели установленной рентгеновской трубки. Для микротомографов он варьируется в диапазоне 20–150 Kv 20–1000 μ A. В анализаторы кернов и дефектоскопы могут устанавливать трубки с неизменяемым значением энергии. Низкие энергии в диапазоне 20–50 Kv хорошо подходят для съемки образцов с низким поглощением рентгеновского излучения – древесина, большинство пластмасс, тонкая костная ткань и др. Этот диапазон энергий допустимо использовать для изучения почвенных структур с большим содержанием органического вещества, например, торфяных горизонтов. При энергиях 70–100 Kv удобно снимать монолиты диаметром 1–5 см. При таких энергиях

хорошо различима структура твердой фазы, агрегированность, поровое пространство и органические объекты в почве (корни и др.). Энергии свыше 100 Кв понадобятся для объектов с высоким поглощением и диаметром 8 см и более. Однако при высоких значениях энергии возможно снижение контрастности. На 400 Кв фактически ничто не будет различимо, кроме твердой фазы и порового пространства.

2) Пространственное разрешение (Image Pixel Size, мкм) – размер одного пикселя изображения. Для анализаторов керна разрешение обычно фиксировано (70, 100 или 200 мкм), для медицинских томографов разрешение также фиксировано, но еще и не изометрично. Пиксель вместо кубика будет “вытянутым” с разрешением, например, $240 \times 240 \times 600$ мкм. На томографах других типов такое не встречается. Микротомографы обычно снимают с разрешением в диапазоне примерно от 1 до 50 мкм с небольшой разницей в обе стороны. Есть прямая зависимость разрешения и размеров образца. Невозможно 10-сантиметровый монолит снять с разрешением 1 мкм. Всегда будет ограничение по полю зрения и крайним положениям рентгеновского источника и детектора. Маленький монолит можно переместить близко к источнику излучения, что позволит снять его гораздо более детально.

3) Шаг съемки (Rotation Step, угловой шаг) – угол поворота образца, через которой делается съемка теневой проекции. При детальной микросъемке угол поворота обычно составляет 0.15° – 0.25° , при грубой съемке достигает 0.8° и более. Выставляется вручную, влияет на общее время томографической съемки. Чем выше значение – тем меньше итоговых теневых проекций. Неправильное значение (грубее чем необходимо) отрицательно скажется на детализации изображения, особенно по краям, где расхождение теневых проекций будет особенно заметно в форме “вытягивания” элементов изображения от центра к краю. Завышенное значение на качество не повлияет, но резко увеличит длительность съемки на объем данных.

4) Траектория съемки. В абсолютном большинстве томографов реализована кольцевая траектория. Это позволяет снимать одиночные образцы почвы в поле зрения камеры за один сегмент, а более крупные – расположить вертикально и снять 2 и более сег-

ментов с последующей “склежкой” на этапе реконструкции данных. У такого типа съемки имеется недостаток, известный еще с первых томографических исследований и не только почвы, – кольцевые артефакты. Контрастные частицы или просто точечные объекты могут “потянуть” за собой кольцо другого оттенка (рис. 6).

Это ошибка реконструкции, для борьбы с которой существуют несколько решений. Одно из которых, и, вероятно, самое эффективное, использование другой траектории съемки, если это возможно. В некоторых томографах (анализаторы кернов, лабораторные модели Bruker Skyscan 1273, Neoscan N80 и др.) возможность выбора траектории реализована, но не всегда идеально. Проблема в размере итоговых данных съемки (суммарный объем теневых проекций), которые будут в разы больше, чем при использовании кольцевой траектории.

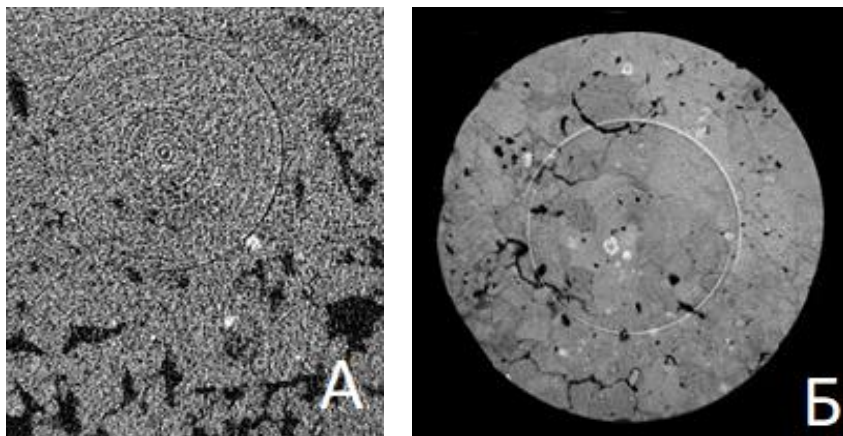


Рис. 6. Проявление кольцевого артефакта на томографических срезах. **А)** Тонкие кольца, обычно легко удаляемые при реконструкции. **Б)** Массивные кольца, сложно удаляемые программными фильтрами.

Fig. 6. Appearance of ring artifacts on tomographic slices. **A)** Thin rings, usually easily removed during reconstruction. **B)** Massive rings, difficult to remove using software filters.

5) Металлические фильтры. “Фильтр” в рентгеновской томографии представляет собой металлическую пластину толщиной в диапазоне от 0.1 до 1 мм, расположенную на пути луча между источником рентгеновского излучения и камерой, через которую рентгеновские лучи проходят либо до, либо после прохождения образца. Фильтр удаляет низкоэнергетическую часть спектра энергий рентгеновского излучения. Фильтры желательно использовать при наличии в исследуемом образце объектов с высоким и низким поглощением рентгеновского излучения. Без использования фильтров высока вероятность того, что органические объекты в образце почвы при реконструкции будут трудно отделимы или вообще неотличимы от порового пространства на фоне твердой фазы почвы, которая обладает высоким уровнем поглощения. Также без использования фильтра вероятен ряд артефактов изображения – появление яркой кромки поверхности образца, перепады контрастности и др. Обычно фильтры изготавливаются из алюминия или меди, реже из титана, и к ним привязываются настройки (пресеты) энергии томографа, образуя предлагаемые режимы съемки, которые можно вручную корректировать. Так для небольших образцов почвы диаметром от 1 мм до нескольких сантиметров часто используется алюминиевый фильтр с толщиной 0.25–1 мм. Для образцов большого диаметра (5–10 см.) обычно используются наиболее толстые, а иногда и составные фильтры (Cu или Al+Cu) совместно с высокой энергией съемки.

6) Количество накоплений (Averaging). Под этим параметром понимается количество снимков теневых проекций с одного углового шага. Параметр, необходимый для коррекции цифрового шума путем его вычитания при наложении нескольких проекций друг на друга. При кольцевой съемке на 360° оптимальным для систем Bruker считается значение 3, для 180° – 6. В обоих случаях общее время съемки образца будет равным. Для систем Neoscan 3 накоплений достаточно для большинства режимов. Опытным путем было установлено, что при съемке плотного образца диаметром 2.5 см на томографе SkyScan 1172 какие-либо изменения в изображении исчезают после 14 накоплений. При 16, 20 и более результат получается аналогичным, но общее время съемки значительно увеличивается.

7) Угол съемки (180° или 360°). Он же общий угол поворота образца при съемке. Образцы с высоким поглощением рекомендуются снимать на 360° на системах Bruker SkyScan 1172–1174, несмотря на вдвое большее время съемки. Это нужно для более качественной реконструкции данных. Также это может пригодиться в результате порчи части данных путем переключения в режим “реконструировать образец только на 180° , начиная с точки № ...” в программах реконструкции, где это возможно, например, Bruker nRecon.

8) Выдержка (Camera Exposure, мс). Время экспозиции при съемке каждого накопления. В современных томографах выдержка фиксированная для разных режимов, но с возможностью ручной корректировки. Обычно в процессе длительной эксплуатации томографа выдержку приходится корректировать в сторону увеличения. Для объектов с высоким поглощением выдержка длительная (более 1 сек.), для объектов с низким поглощением – короткая (миллисекунды). Для систем Bruker SkyScan установка выдержек вынесена в сервис-меню и не доступна без предварительного нажатия клавиш Ctrl+Alt+Shift+S, для Neoscan ситуация аналогична, только другое сочетание клавиш – Ctrl+update flat field. Для систем Bruker возможна коррекция выдержки через реестр Windows. Следует учитывать, что, если время экспозиции для объектов с высоким поглощением в результате коррекции превышает 5 сек. (для систем Bruker SkyScan), – это признак серьезной деградации рентгеновской трубки и основание для ее замены.

9) Формат файла теневой проекции. Теневые проекции в КТ-системах создаются в градациях серого. Современные ПЗС матрицы и флэт-панели на основе КМОП-датчиков создают 12- или 14-битные изображения, что определяет наилучший для использования формат файла – TIFF (с поддержкой 16 бит). Также в большинстве систем возможно сохранение теневых проекций в форматы BMP, PNG или JPEG, но это неоправданно, т. к. это форматы 8-битные, и часть информации будет теряться.

10) “Панорамный” режим съемки. Настройка, реализованная в ряде моделей Bruker SkyScan для съемки крупногабаритных, но сравнительно легко просвечиваемых объектов, что среди почвенных образцов встречается очень редко. Монолит снимается по ча-

стям, а сама съемка одного сегмента разбивается на 8 фрагментов (для модели томографа Bruker Skyscan 1172). Из-за увеличения времени съемки минимум в 8 раз (если не уменьшать угловой шаг) целесообразность использования этого режима для исследования почв сомнительна.

ПРОБЛЕМЫ РАЗРАБОТКИ ПРОТОКОЛОВ ДЛЯ ТОМОГРАФИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ

Исходя из многолетнего опыта изучения почв методом компьютерной томографии, подбора и использования рентген-контрастных материалов и программного обеспечения в лаборатории Физики и гидрологии почв были сформированы методические требования для подготовки препаратов для КТ-исследования и протоколы томографической съемки для нескольких типов монолитов и микромонолитов на двух имеющихся в распоряжении лаборатории рентгеновских микротомографах – Neoscan N80 и Bruker SkyScan 1172. А также для монолитов, пригодных для съемки на анализаторах кернов.

Единого протокола для томографической съемки почвенных образцов добиться невозможно из-за множества переменных (разный тип и сложение почвенных образцов, немного различные диаметры, разная влажность почвы и др.), которые придется учитывать. Но есть возможность сделать подобие пресетов для почвенных образцов разного диаметра по аналогии с медицинскими томографами, где настройки будут варьироваться в небольшом диапазоне (табл. 2). Образцы различных почв, но сопоставимого диаметра, будут также близки по рентгеновской проницаемости и не потребуют серьезных корректировок настроек. Единственным исключением могут стать образцы органических или торфяных горизонтов соответствующих почв, где понадобится изменять энергию съемки в сторону уменьшения, как и время экспозиции, и, соответственно, серьезно скорректируется общее время съемки образца. Таким образом, для образца почвы типа “монолит” или “микромонолит” можно подготовить 5 еще не протоколов, но оснований для успешной съемки. Размеры и тип образцов, их краткая подготовка, совместимые с ними томографы и результат съемки приведены в таблице 1.

Таблица 1. Размеры и назначение монолитов и микромонолитов
Table 1. Dimensions and purpose of monoliths and micromonoliths

Тип образца, габариты, размеры видимых объектов (на примере пор)	Форма, используемые материалы	Пригодный томограф, вероятное пространственное разрешение результата, ориентировочное время съемки
Монолит, фрагмент монолита, D = 8–11 см, L = 10–100 см Подходит для изучения крупных и средних макропор в масштабе почвенного профиля	Цилиндр, полипропиленовая труба с крышками. Зазоры сверху и снизу поджимаются смятой пвх-пленкой. Монолит вырезается в вертикальной проекции из разреза путем окапывания (обтачивания) колонны почвы нужного диаметра и постепенным надвигом на нее трубы сверху.	Анализаторы кернов (РКТ или зарубежные аналоги), медицинские томографы. Пространственное разрешение минимум 70 мкм, при энергии съемки 180 Kv. 1000 × 1000 pix. Несколько минут.
Монолит, фрагмент монолита, D = 8–11 см, L = до 10 см Подходит для изучения макропор вплоть до 70 мкм. Для мезопор не годится.	Цилиндр, полипропиленовая труба с крышками. Зазоры сверху и снизу поджимаются смятой пвх-пленкой. Монолит вырезается в вертикальной проекции из разреза путем окапывания (обтачивания) колонны почвы нужного диаметра и постепенным надвигом на нее трубы сверху.	1) Анализаторы кернов (РКТ или зарубежные аналоги). Медицинские томографы. Пространственное разрешение минимум 70 мкм, при энергии съемки 180 Kv. 1000 × 1000 pix. Несколько минут. 2) Neoscan N80 (с флет-панелью). 27–35 мкм при энергии 110 Kv, 2700 × 2700 pix. 2–12 часов.

Продолжение таблицы 1
Table 1 continued

Тип образца, габариты, размеры видимых объектов (на примере пор)	Форма, используемые материалы	Пригодный томограф, вероятное пространственное разрешение результата, ориентировочное время съемки
Монолит, фрагмент монолита, $D = 4-5$ см, $L =$ до 10 см Подходит для изучения мезопористых структур в диапазоне от 20 до 70 мкм. Для изучения макропор недостаточный объем.	Цилиндр, полипропиленовая или акриловая труба с крышками. Иной вариант – крупный шприц 150 200 мл. Герметизируется пленкой, скотчем и воском (носик шприца). Монолит вырезается в вертикальной проекции из разреза путем окапывания (обтачивания) колонны почвы нужного диаметра и постепенным надвигом на нее трубы сверху.	Neoscan N80 (с флет-панелью). 16–20 мкм при энергии 70–110 Kv, 2700 × 2700 pix. 1–4 часа.
Микромонолит, $D = 3-2$ см, $L =$ до 5 см Подходит для изучения всего диапазона мезопор. Для макро и микропор не пригоден.	Шприц 50–20 мл. Герметизируется пленкой, скотчем и воском (носик шприца). Монолит вырезается в вертикальной проекции из разреза путем (обтачивания) колонны почвы нужного диаметра и постепенным надвигом на нее трубы сверху	1) Neoscan N80 (с флет-панелью). 8–16 мкм при энергии 50–110 Kv, 2700 × 2700 pix. 1–4 часа. 2) SkyScan 1172 (11 mp), 4–8 мкм при энергии 60–100 Kv, до 4000 × 4000, от 8 часов и более.

Продолжение таблицы 1
Table 1 continued

Тип образца, габариты, размеры видимых объектов (на примере пор)	Форма, используемые материалы	Пригодный томограф, вероятное пространственное разрешение результата, ориентировочное время съемки
Микромонолит, D = 1 см, L = 2 см. Подходит для детального изучения структуры на стыке мезо- и микропористости	Шприц 10 мл. Герметизируется пленкой, скотчем и воском (носик шприца). Вырезается в вертикальной проекции из разреза или более крупного монолита путем обтачивания колонны почвы ножом нужного диаметра и постепенным надвигом на нее трубы сверху.	1) Neoscan N80 (с флет-панелью). 4–8 мкм при энергии 50–70 kv, 2700 × 2700 pix. 20 мин. и больше. 2) SkyScan 1172 (11 mp), 2–5 мкм при энергии 50–100 kv, до 4000 × 4000, от 2 часов и более.
Агрегат (или частица почвы), размерная фракция 3–2 мм. Подходит для изучения микропористости и внутриагрегатных пор	Предпочтительно сухое состояние (в увлажненном критически трудно загерметизировать образец и сделать для него прочное крепление к предметному столу). Упаковка между слоями пенопласта в тонком шприце (объемом не более 5 мл или шприце для инъекций инсулина). Для SkyScan 1172 допускается упаковка сразу нескольких частиц (до 8–10) без пересечения по высоте.	SkyScan 1172 (11 mp), 0.75–3 мкм при энергии 50–100 kv, до 4000 × 4000, от 2 часов и более.

Таблица 2. Базовые настройки томографической съемки
Table 2. Basic settings for tomographic imaging

Тип образца, габариты	Базовые настройки томографической съемки
Монолит, фрагмент монолита, D = 8–11 см, L = 10–100 см	Source Voltage 180 kV Image Pixel Size (um) = 100 Scanning Trajectory = SPIRAL
Монолит, фрагмент монолита, D = 8–11 см, L = до 10 см	**Source Voltage 110 kV, 37 uA Camera Exposure (ms) = 2426 Filter = Cu 1.0 mm Image Pixel Size (um) = 35 Rotation Step (deg) = 0.200 Averaging (Nframes) = 3 Use 360 Rotation = YES Scanning Trajectory = ROUND Total Duration (2 Subscans) = 8 h 35 min*
Монолит, фрагмент монолита, D = 4–5 см, L = до 10 см	**Source Voltage 75 kV, 53 uA Camera Exposure (ms) = 324 Filter = Al 1.0 mm Image Pixel Size (um) = 17.5 Rotation Step (deg) = 0.200 Averaging (Nframes) = 5 Use 360 Rotation = YES Scanning Trajectory = ROUND Total Duration (2 Subscans) = 2 h 38 min*
Микромонолит, D = 3–2 см, L = до 5 см	**Source Voltage 58 kV, 68 uA Camera Exposure (ms) = 196 Filter = Al 0.25 mm Image Pixel Size (um) = 8.750080 Rotation Step (deg) = 0.200 Averaging (Nframes) = 5 Use 360 Rotation = NO Scanning Trajectory = ROUND Total Duration (3 Subscans) = 1 h 47 min*

Продолжение таблицы 2
Table 2 continued

Тип образца, габариты	Базовые настройки томографической съемки
Микромоноклит, D = 1 см, L = 2 см	**Source Voltage 58 kV, 68 uA Camera Exposure (ms) = 196 Filter = Al 0.25 mm Image Pixel Size (um) = 4.375040 Rotation Step (deg) = 0.200 Averaging (Nframes) = 5 Use 360 Rotation = NO Scanning Trajectory = ROUND Scan Duration = 34 min 43 sec
Агрегат (частица почвы) размер- ной фракции 3–2 мм	Source Voltage 70 kV, 129 uA Camera Exposure (ms) = 2900 Filter = Al 0.5 mm Image Pixel Size (um) = 1.001 Rotation Step (deg) = 0.200 Averaging (Nframes) = 3 Use 360 Rotation = NO Scanning Trajectory = ROUND Scan Duration = 03:58:34

Примечание. *Время съемки указано для нескольких сегментов.

****Значения настроек для Neoscan N80.**

Note. *Acquisition time is indicated for several segments.

****Setting values for Neoscan N80.**

Детальные настройки съемки для тех же образцов приведены в таблице 2. Большинство данных для Neoscan N80 в таблицах 1 и 2 приведено на основе опыта съемок первых двух лет для проекта РНФ 23-74-00069 (Абросимов, 2023). Для SkyScan использованы результаты съемок для проекта РНФ 23-74-00069 (агрегаты), а также результаты съемок, по которым был выпущен ряд статей (Шеин и др., 2017; Skvortsova et al., 2020; Gorbov et al., 2022; Fomin et al., 2023) и докладов (Шоркунов и др., 2018). Результаты съемки на анализаторе кернов частично использованы в статье про алгоритмы сегментации (Abrosimov et al., 2021).

Время съемки рассчитывается автоматически и сильно меняется при изменении настроек. Настройки из таблицы 2 допустимо применять для съемки образцов одного диаметра, но в рамках разных задач желательно вносить коррективы. Так для исследования корневых систем желательно не использовать энергию съемки выше 70 Kv (Шеин и др., 2021; Суздалева и др., 2022) а фильтр толще 1 mm (Al). Медные фильтры использовать так же крайне нежелательно. А вот угловой шаг сделать меньше (0.2° до 0.15°) и количество накоплений увеличить до 6–10. Для задач исследования морфологии порового пространства, наоборот, желательно сделать приоритет времени, но не в ущерб детализации, т. к. поры и твердая фаза – контрастные объекты и хорошо различимы на фоне друг друга. Уплотнение почв практически не детектируется по малым образцам, снятым с разрешением 2–1 мкм (Gogbov et al., 2022). Под эту задачу лучше отбирать монолиты или микромонолиты диаметром до 3 см.

Настройки в таблице 2 для каждого из пяти типоразмеров не являются безусловными для всех почв без исключения. Торфяной или органический горизонт всегда будет исключением, т. к. его рентген-проницаемость намного выше. Это же относится к почвам с древесными остатками (Шоркунов и др., 2018), углями разного возраста, конструкторам с торфом (Шеин и др., 2017) и прочим аналогичным объектам исследования. Съемка с приоритетом “третьей фазы”, которая по проницаемости сопоставима с водой в порах или чуть выше, но значительно отличается от воздуха и минеральной (твердой) фазы почв всегда потребует значительно больше времени, чем просто съемка под задачу исследования структуры пор для тех же образцов.

ВЛАЖНОСТЬ ПОЧВЫ И ЕЕ ВЛИНИЕ НА РЕЗУЛЬТАТ СЪЕМКИ

Почвенная влага способна оказывать влияние на результат томографической съемки. Если снять один и тот же образец почвы в воздушно-сухом состоянии и при избыточном насыщении, когда практически все поровое пространство будет заполнено водой, при полностью идентичных настройках, результат съемки почвы с водой, помимо явных признаков набухания (изменений размеров и

пористости), будет менее контрастным и немного более темным (рис. 7). При небольшой влажности почвы потемнение практически незаметно и не выявляется программно. Наиболее явно такое проявляется на торфяных горизонтах почв или органических горизонтах в местах археологических раскопок. Подобный эффект потребует корректировки протокола сегментации, т. к. порог разделения поры/почва может существенно отличаться.

Еще одно свойство свободной воды в порах – ее полное совпадение по рентген-контрастной фазе с корнями растений, что делает бессмысленным томографическую съемку препарата с растением, которое только что полили водой.

Из “положительных” свойств – влажную почву всегда удобнее отбирать для томографического исследования в полевых условиях, чем почти полностью сухую.

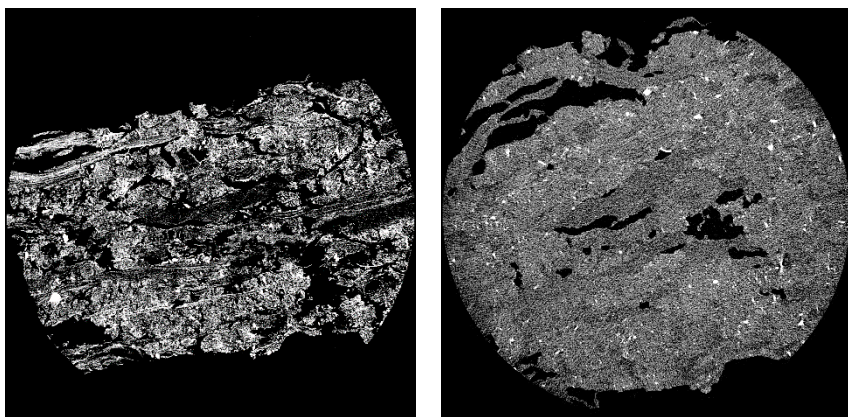


Рис. 7. Фрагмент горизонта погребенной слаборазвитой почвы в толще органического слоя в сухом и переувлажненном состоянии. Из коллекции А. Долгих (Шоркунов и др., 2018).

Fig. 7. Fragment of a buried weakly developed soil horizon within the organic layer, shown in dry and overwetted states. From the collection of A. Dolgikh (Shorkunov et al., 2018).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Соблюдение условий отбора и методики съемки почвенных образцов – гарантия успешного томографического исследования. Итогом томографической съемки должен стать стек (набор) теневых проекций, пригодный для реконструкции без каких-либо ограничений и корректировок. Ошибки, допущенные на этих этапах, фактически не исправимы. Если однократное смещение образца при съемке еще можно программно исправить на этапе реконструкции (Sasov et al., 2008), то многократное – уже нет. Протоколы съемки несовершенны и, по сути, гораздо ближе к методическим рекомендациям, чем к тому, что обычно является протоколом. Достаточно на конструктивной базе того же томографа Neoscan N80 использовать трубку мощнее в 5 раз (аналоги уже существуют, в т. ч. и в томографах отечественного производства – Рентом migo CT и др.), и настройки съемки изменятся практически полностью. Для образцов диаметром 8–10 см достаточно будет использовать энергию 50–70 Kv под любые перечисленные выше задачи, а не выкручивать ее на максимум в попытке просветить почву на 4–5% получше и получить чуть меньше шумов в результате. Количество накоплений также можно будет сократить до минимума. При этом “горизонт диаметров” образцов расширится, и придется разрабатывать оптимальный протокол уже для 30 см или более. Универсальный протокол останется недостижимым, как и универсальный томограф, для любых образцов, даже для любых почвенных образцов. Создание работоспособных протоколов возможно только в масштабе одного типа почв или группы почв с очень близкой рентгеновской плотностью и внутренней структурой, но при этом корректируемых параметров избежать не удастся. Даже один и тот же томограф разного возраста будет выдавать сильно различные данные с одинаковыми настройками.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абросимов, К.Н. *Связь нано- и микроструктурных особенностей строения почв: от репрезентативности к многомасштабной цифровой модели*. Отчет о НИР/НИОКР (промежуточный), 2023.
2. Корост, Д.В. *Неоднородность строения терригенных коллекторов и типы структуры их пустотного пространства (на примере верхней*

части тюменской свиты Урненского нефтяного месторождения Западной Сибири): Дис. ... канд. геол.-минерал. наук, Москва, 2012; 175 с.

3. Суздалева, А.В.; Шеин, Е.В.; Абросимов, К.Н.; Дембовецкий, А.В. Структура порового пространства почв, прорастающих корней и микробного сообщества в консорциуме почва–растения–микроорганизмы в почвах модельного семенного ложа ячменя. *Проблемы агрохимии и экологии* **2022**, (2), 45–50. <https://doi.org/10.26178/AE.2022.19.44.001>.

4. Шеин, Е.В.; Верховцева, Н.В.; Суздалева, А.В.; Абросимов, К.Н. Рентгеновская компьютерная томография структуры корней и динамика почвенной биоты на ранних стадиях роста ячменя (*Hordeum vulgare* L.). *Вестник Томского государственного университета. Биология* **2021**, (53), 6–21.

5. Шеин, Е.В.; Торбик, Е.А.; Абросимов, К.Н. Изменения порового пространства почвенных конструкций в лабораторных физических моделях. *Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение* **2017**, (1), 35–38.

6. Шоркунов, И.; Долгих, А.; Абросимов, К. Первые результаты микротомографических исследований переувлажненных органических культурных слоев древних городов лесной зоны Европейской России. *Пятая Международная научная конференция “Практическая микротомография”*; Москва, Россия, 2018.

7. Abrosimov, K.N.; Gerke, K.M.; Fomin, D.S.; Romanenko, K.A.; Korost, D.V. Tomography in Soil Science: From the First Experiments to Modern Methods (A Review). *Eurasian Soil Science* **2021**, (54), 1385–1399. <https://doi.org/10.1134/S1064229321090027>.

8. Abrosimov, K.N.; Gerke, K.M.; Semenov, I.N.; Korost, D.V. Otsu's Algorithm in the Segmentation of Pore Space in Soils Based on Tomographic Data. *Eurasian Soil Science* **2021**, (54), 560–571.

9. Chirol, C.; Carr, S.J.; Spencer, K.L.; Moeller, I. Pore, Live Root and Necromass Quantification in Complex Heterogeneous Wetland Soils Using X-ray Computed Tomography. *Geoderma* **2021**, (387), 114898. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114898>.

10. Cormack, A.M. Representation of a Function by Its Line Integrals, with Some Radiological Applications. *Journal of Applied Physics* **1963**, (34), 2722. <https://doi.org/10.1063/1.1729798>.

11. Cormack, A.M. Representation of a Function by Its Line Integrals, with Some Radiological Applications. II. *Journal of Applied Physics* **1964**, (35), 2908. <https://doi.org/10.1063/1.1713127>.

12. Cullity, B.D.; Stock, S.R. *Elements of X-ray Diffraction*; Prentice-Hall: Upper Saddle River, NJ, 2001.
13. Fomin, D.S.; Yudina, A.V.; Romanenko, K.A.; et al. Soil Pore Structure Dynamics under Steady-State Wetting-Drying Cycle. *Geoderma* **2023**, (432), 116401. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116401>.
14. Gorbov, S.N.; Abrosimov, K.N.; Bezuglova, O.S.; Skvortsova, E.B.; Tagiverdiev, S.S.; Tishchenko, S.A. X-ray Microtomography Analysis of Urban Soils of the Rostov Region. *Geoderma Regional* **2022**, (31), e00592. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2022.e00592>.
15. Halmshaw, R. *Non-Destructive Testing*; Edward Arnold: London, 1991.
16. Herrero-Huerta, M.; Meline, V.; Iyer-Pascuzzi, A.S.; et al. 4D Structural Root Architecture Modeling from Digital Twins by X-Ray Computed Tomography. *Plant Methods* **2021**, (17), 123. <https://doi.org/10.1186/s13007-021-00819-1>.
17. Hounsfield, G.N. Computerized Transverse Axial Scanning (Tomography). *British Journal of Radiology* **1973**, (46), 1016–1022.
18. Kaur, P.; Lamba, J.; Way, T.R.; Balkcom, K.S.; Sanz-Saez, A.; Watts, D.B. Characterization of Soil Pores in Strip-Tilled and Conventionally-Tilled Soil Using X-ray Computed Tomography. *Soil and Tillage Research* **2024**, (239), 106035.
19. Li, Q.; Qian, Y.; Wang, Y.; Peng, X. The Relation between Soil Moisture Phase Transitions and Soil Pore Structure under Freeze–Thaw Cycling. *Agronomy* **2024**, (14), 1608. <https://doi.org/10.3390/agronomy14081608>.
20. Lontoc-Roy, M.; Dutilleul, P.; Prasher, S.O.; Han, L.; Smith, D.L. Computed Tomography Scanning for Three-Dimensional Imaging and Complexity Analysis of Developing Root Systems. *Canadian Journal of Botany* **2005**, (83), 1434–1442.
21. Lucas, M.; Schlüter, S.; Vogel, H.-J.; et al. Roots Compact the Surrounding Soil Depending on the Structures They Encounter. *Scientific Reports* **2019**, (9), 16236. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-52665-w>.
22. Miyoshi, Y.; et al. Plant Root PET: Visualization of Photosynthate Translocation to Roots in Rice Plant. *Journal of Instrumentation* **2021**, (16), C1.
23. Mooney, S.J. Three-Dimensional Visualization and Quantification of Soil Macroporosity and Water Flow Patterns Using Computed Tomography. *Soil Use and Management* **2002**, (18), 142–151. <https://doi.org/10.1079/SUM2002121>.
24. Nagayama, T.; Anselmucci, F.; Lenoir, N.; Sibille, L.; Mukunoki, T.; Otani, J.; Viggiani, G. Experimental Measurement of Root Growth and Root–Soil Interaction in a Bilayered Sand Using X-ray Tomography. *Géotechnique Letters* **2025**, (15), 143–148.

25. Perret, J.S. *Characterization, Visualization and Quantification of Soil Macropores and Preferential Flow Using SPECT and X-ray CAT Scanning*. Ph.D. Thesis, McGill University, Montréal, Canada, 1998.
26. Pessoa, T.N.; Ferreira, T.R.; Pires, L.F.; Cooper, M.; Uteau, D.; Peth, S.; Vaz, C.M.P.; Libardi, P.L. X-ray Microtomography for Investigating Pore Space and Its Relation to Water Retention and Conduction in Highly Weathered Soils. *Agriculture* **2023**, (13), 28. <https://doi.org/10.3390/agriculture13010028>.
27. Pfeifer, J.; Kirchgessner, N.; Colombi, T.; et al. Rapid Phenotyping of Crop Root Systems in Undisturbed Field Soils Using X-ray Computed Tomography. *Plant Methods* **2015**, (11), 41. <https://doi.org/10.1186/s13007-015-0084-4>.
28. Pöhlitz, J.; Rücknagel, J.; Koblenz, B.; Schlüter, S.; Vogel, H.-J.; Christen, O. Computed Tomography and Soil Physical Measurements of Compaction Behaviour under Strip Tillage, Mulch Tillage and No Tillage. *Soil and Tillage Research* **2018**, (175), 205–216. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.09.007>.
29. Rabot, E.; Wiesmeier, M.; Schlüter, S.; Vogel, H.J. Soil Structure as an Indicator of Soil Functions: A Review. *Geoderma* **2018**, (314), 122–137.
30. Sasov, A.; Liu, X.; Salmon, P.L. Compensation of Mechanical Inaccuracies in Micro-CT and Nano-CT. *Proc. SPIE* **2008**, (7078), 70781C. <https://doi.org/10.1117/12.793212>.
31. Schlüter, S.; Sammartino, S.; Koestel, J. Exploring the Relationship between Soil Structure and Soil Functions via Pore-Scale Imaging. *Geoderma* **2020**, (370), 114370.
32. Skvortsova, E.B.; Shein, E.V.; Romanenko, K.A.; et al. Formation of Vesicular Pores in Aggregates from the Eluvial Horizon of Albic Glossic Retisol during Freeze-Thaw Cycles. *Eurasian Soil Science* **2020**, (53), 913–921. <https://doi.org/10.1134/S1064229320070145>.
33. Shein, E.V.; Skvortsova, E.B.; Dembovetskii, A.V.; Abrosimov, K.N.; Il'in, L.I.; Shnyrev, N.A. Pore-Size Distribution in Loamy Soils: A Comparison between Microtomographic and Capillarimetric Determination Methods. *Eurasian Soil Science* **2016**, (49), 315–325. <https://doi.org/10.1134/S1064229316030091>.
34. Stock, S.R. *MicroComputed Tomography: Methodology and Applications*; CRC Press: Boca Raton, FL, 2009.
35. Wang, W.; Zhang, Y.; Li, H. Quantification of Soil Structure via Synchrotron X-ray Tomography after 22 Years of Fertilization. *European Journal of Soil Science* **2021**, (72), 2115–2127. <https://doi.org/10.1111/ejss.13108>.

36. Wang, L.; Wang, H.; Tian, Z.; Lu, Y.; Gao, W.; Ren, T. Structural Changes of Compacted Soil Layers in Northeast China Due to Freezing-Thawing Processes. *Sustainability* **2020**, (12), 1587.
37. Yu, X.; Lu, S. Reconfiguration of Macropore Networks in a Silty Loam Soil Following Biochar Addition Identified by X-ray Microtomography and Network Analyses. *European Journal of Soil Science* **2018**. <https://doi.org/10.1111/ejss.12773>.

REFERENCES

1. Abrosimov, K.N. *Relationship between Nano- and Microstructural Features of Soil Structure: From Representativeness to a Multi-Scale Digital Model*. Research Report (Interim), 2023. (In Russ.)
2. Korost, D.V. *Heterogeneity of the Structure of Terrigenous Reservoirs and Types of Pore Space Structure (Case Study of the Upper Part of the Tyumen Formation of the Urnenskoye Oil Field, Western Siberia)*: Cand. Geol.-Mineral. Sci. Thesis, Moscow, 2012; 175 p. (In Russ.)
3. Suzdaleva, A.V.; Shein, E.V.; Abrosimov, K.N.; Dembovetsky, A.V. Pore Space Structure of Soils, Germinating Roots, and Microbial Community in the Soil-Plant-Microorganism Consortium in Soils of a Model Seed Bed of Barley. *Problems of Agrochemistry and Ecology* **2022**, (2), 45–50. <https://doi.org/10.26178/AE.2022.19.44.001>. (In Russ.)
4. Shein, E.V.; Verkhovtseva, N.V.; Suzdaleva, A.V.; Abrosimov, K.N. X-ray Computed Tomography of Root Structure and Dynamics of Soil Biota at Early Stages of Barley (*Hordeum vulgare* L.) Growth. *Tomsk State University Journal of Biology* **2021**, (53), 6–21. (In Russ.)
5. Shein, E.V.; Torbik, E.A.; Abrosimov, K.N. Changes in the Pore Space of Soil Constructs in Laboratory Physical Models. *Moscow University Bulletin. Series 17: Soil Science* **2017**, (1), 35–38. (In Russ.)
6. Shorkunov, I.; Dolgikh, A.; Abrosimov, K. First Results of Microtomographic Studies of Waterlogged Organic Cultural Layers of Ancient Cities in the Forest Zone of European Russia. In *Fifth International Scientific Conference “Practical Microtomography”*; Moscow, Russia, 2018. (In Russ.)
7. Abrosimov, K.N.; Gerke, K.M.; Fomin, D.S.; Romanenko, K.A.; Korost, D.V. Tomography in Soil Science: From the First Experiments to Modern Methods (A Review). *Eurasian Soil Science* **2021**, (54), 1385–1399. <https://doi.org/10.1134/S1064229321090027>.
8. Abrosimov, K.N.; Gerke, K.M.; Semenov, I.N.; Korost, D.V. Otsu's Algorithm in the Segmentation of Pore Space in Soils Based on Tomographic Data. *Eurasian Soil Science* **2021**, (54), 560–571.

9. Chirol, C.; Carr, S.J.; Spencer, K.L.; Moeller, I. Pore, Live Root and Necromass Quantification in Complex Heterogeneous Wetland Soils Using X-ray Computed Tomography. *Geoderma* **2021**, (387), 114898. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114898>.
10. Cormack, A.M. Representation of a Function by Its Line Integrals, with Some Radiological Applications. *Journal of Applied Physics* **1963**, (34), 2722. <https://doi.org/10.1063/1.1729798>.
11. Cormack, A.M. Representation of a Function by Its Line Integrals, with Some Radiological Applications. II. *Journal of Applied Physics* **1964**, (35), 2908. <https://doi.org/10.1063/1.1713127>.
12. Cullity, B.D.; Stock, S.R. *Elements of X-ray Diffraction*; Prentice-Hall: Upper Saddle River, NJ, 2001.
13. Fomin, D.S.; Yudina, A.V.; Romanenko, K.A.; et al. Soil Pore Structure Dynamics under Steady-State Wetting-Drying Cycle. *Geoderma* **2023**, (432), 116401. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116401>.
14. Gorbov, S.N.; Abrosimov, K.N.; Bezuglova, O.S.; Skvortsova, E.B.; Tagiverdiev, S.S.; Tishchenko, S.A. X-ray Microtomography Analysis of Urban Soils of the Rostov Region. *Geoderma Regional* **2022**, (31), e00592. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2022.e00592>.
15. Halmshaw, R. *Non-Destructive Testing*; Edward Arnold: London, 1991.
16. Herrero-Huerta, M.; Meline, V.; Iyer-Pascuzzi, A.S.; et al. 4D Structural Root Architecture Modeling from Digital Twins by X-Ray Computed Tomography. *Plant Methods* **2021**, (17), 123. <https://doi.org/10.1186/s13007-021-00819-1>.
17. Hounsfield, G.N. Computerized Transverse Axial Scanning (Tomography). *British Journal of Radiology* **1973**, (46), 1016–1022.
18. Kaur, P.; Lamba, J.; Way, T.R.; Balkcom, K.S.; Sanz-Saez, A.; Watts, D.B. Characterization of Soil Pores in Strip-Tilled and Conventionally-Tilled Soil Using X-ray Computed Tomography. *Soil and Tillage Research* **2024**, (239), 106035.
19. Li, Q.; Qian, Y.; Wang, Y.; Peng, X. The Relation between Soil Moisture Phase Transitions and Soil Pore Structure under Freeze–Thaw Cycling. *Agronomy* **2024**, (14), 1608. <https://doi.org/10.3390/agronomy14081608>.
20. Lontoc-Roy, M.; Dutilleul, P.; Prasher, S.O.; Han, L.; Smith, D.L. Computed Tomography Scanning for Three-Dimensional Imaging and Complexity Analysis of Developing Root Systems. *Canadian Journal of Botany* **2005**, (83), 1434–1442.
21. Lucas, M.; Schlüter, S.; Vogel, H.-J.; et al. Roots Compact the Surrounding Soil Depending on the Structures They Encounter. *Scientific Reports* **2019**, (9), 16236. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-52665-w>.

22. Miyoshi, Y.; et al. Plant Root PET: Visualization of Photosynthate Translocation to Roots in Rice Plant. *Journal of Instrumentation* **2021**, (16), C1.
23. Mooney, S.J. Three-Dimensional Visualization and Quantification of Soil Macroporosity and Water Flow Patterns Using Computed Tomography. *Soil Use and Management* **2002**, (18), 142–151. <https://doi.org/10.1079/SUM2002121>.
24. Nagayama, T.; Anselmucci, F.; Lenoir, N.; Sibille, L.; Mukunoki, T.; Otani, J.; Viggiani, G. Experimental Measurement of Root Growth and Root–Soil Interaction in a Bilayered Sand Using X-ray Tomography. *Géotechnique Letters* **2025**, (15), 143–148.
25. Perret, J.S. *Characterization, Visualization and Quantification of Soil Macropores and Preferential Flow Using SPECT and X-ray CAT Scanning*. Ph.D. Thesis, McGill University, Montréal, Canada, 1998.
26. Pessoa, T.N.; Ferreira, T.R.; Pires, L.F.; Cooper, M.; Uteau, D.; Peth, S.; Vaz, C.M.P.; Libardi, P.L. X-ray Microtomography for Investigating Pore Space and Its Relation to Water Retention and Conduction in Highly Weathered Soils. *Agriculture* **2023**, (13), 28. <https://doi.org/10.3390/agriculture13010028>.
27. Pfeifer, J.; Kirchgessner, N.; Colombi, T.; et al. Rapid Phenotyping of Crop Root Systems in Undisturbed Field Soils Using X-ray Computed Tomography. *Plant Methods* **2015**, (11), 41. <https://doi.org/10.1186/s13007-015-0084-4>.
28. Pöhlitz, J.; Rücknagel, J.; Koblenz, B.; Schlüter, S.; Vogel, H.-J.; Christen, O. Computed Tomography and Soil Physical Measurements of Compaction Behaviour under Strip Tillage, Mulch Tillage and No Tillage. *Soil and Tillage Research* **2018**, (175), 205–216. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.09.007>.
29. Rabot, E.; Wiesmeier, M.; Schlüter, S.; Vogel, H.J. Soil Structure as an Indicator of Soil Functions: A Review. *Geoderma* **2018**, (314), 122–137.
30. Sasov, A.; Liu, X.; Salmon, P.L. Compensation of Mechanical Inaccuracies in Micro-CT and Nano-CT. *Proc. SPIE* **2008**, (7078), 70781C. <https://doi.org/10.1117/12.793212>.
31. Schlüter, S.; Sammartino, S.; Koestel, J. Exploring the Relationship between Soil Structure and Soil Functions via Pore-Scale Imaging. *Geoderma* **2020**, (370), 114370.
32. Skvortsova, E.B.; Shein, E.V.; Romanenko, K.A.; et al. Formation of Vesicular Pores in Aggregates from the Eluvial Horizon of Albic Glossic Retisol during Freeze-Thaw Cycles. *Eurasian Soil Science* **2020**, (53), 913–921. <https://doi.org/10.1134/S1064229320070145>.

33. Shein, E.V.; Skvortsova, E.B.; Dembovetskii, A.V.; Abrosimov, K.N.; Il'in, L.I.; Shnyrev, N.A. Pore-Size Distribution in Loamy Soils: A Comparison between Microtomographic and Capillarimetric Determination Methods. *Eurasian Soil Science* **2016**, (49), 315–325. <https://doi.org/10.1134/S1064229316030091>.
34. Stock, S.R. *MicroComputed Tomography: Methodology and Applications*; CRC Press: Boca Raton, FL, 2009.
35. Wang, W.; Zhang, Y.; Li, H. Quantification of Soil Structure via Synchrotron X-ray Tomography after 22 Years of Fertilization. *European Journal of Soil Science* **2021**, (72), 2115–2127. <https://doi.org/10.1111/ejss.13108>.
36. Wang, L.; Wang, H.; Tian, Z.; Lu, Y.; Gao, W.; Ren, T. Structural Changes of Compacted Soil Layers in Northeast China Due to Freezing-Thawing Processes. *Sustainability* **2020**, (12), 1587.
37. Yu, X.; Lu, S. Reconfiguration of Macropore Networks in a Silty Loam Soil Following Biochar Addition Identified by X-ray Microtomography and Network Analyses. *European Journal of Soil Science* **2018**. <https://doi.org/10.1111/ejss.12773>.

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2026-129-84-110



Ссылки для цитирования:

Кондратюк Н.В., Астапчук И.Л., Гладченко Д.Н., Кузнецова Н.А., Смолич О.С., Ребух Н.Я. Микробиом почв различных ампелоценозов // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2026. Вып. 129. С. 84-110. DOI: 10.19047/0136-1694-2026-129-84-110

Cite this article as:

Kondratyuk N.V., Astapchuk I.L., Gladchenko D.N., Kuznetsova N.A., Smolich O.S., Rebouh N.Y., Microbiome of ampelocenoses of various soil types, Dokuchaev Soil Bulletin, 2026, V. 129, pp. 84-110, DOI: 10.19047/0136-1694-2026-129-84-110

Благодарность.

Публикация выполнена в рамках Проекта <№ 202787-2-000> Системы грантовой поддержки научных Проектов РУДН.

Вклад авторов. Концепция – Астапчук И.Л. и Смолич О.С.; методология – Астапчук И.Л.; программное обеспечение – Гладченко Д.Н., Кондратюк Н.В.; валидация – Ребух Н.Я.; формальный анализ – Кузнецова Н.А.; исследование – Кондратюк Н.В.; Кузнецова Н.А., Астапчук И.Л., Смолич О.С., Гладченко Д.Н.; ресурсы – Астапчук И.Л. и Смолич О.С.; обработка данных – Кузнецова Н.А и Ребух Н.Я.; написание – оригинальный текст – Кондратюк Н.В и Ребух Н.Я.; написание – рецензирование и редактирование – Ребух Н.Я.; визуализация – Астапчук И.Л., Ребух Н.Я. Все авторы ознакомились с опубликованной версией рукописи и согласились с ней.

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

Заявление об использовании технологий искусственного интеллекта. При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовались.

Заявление о доступности данных.

Все данные, полученные в ходе этого исследования, включены в опубликованную статью.

Acknowledgments.

The publication has been supported by the RUDN University Scientific Projects Grant System, project № < 202787-2-000>.

Authors' contributions. Conceptualization – Astapchuk I.L. and Smolich O.S.; methodology – Astapchuk I.L.; software – Gladchenko D.N., Kondratyuk N.V.; validation – Rebouh N.Y.; formal analysis – Kuznetsova N.A.; research – Kondratyuk N.V., Kuznetsova N.A., Astapchuk I.L., Smolich O.S., Gladchenko D.N.; resources – Astapchuk I.L. and Smolich O.S.; data processing – Kuznetsova N.A., Rebouh N.Y.; writing – original text – Kondratyuk N.V., Rebouh N.Y.; writing – review and editing – Rebouh N.Y.; visualization – Astapchuk I.L., Rebouh N.Y. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Conflicts of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Statement on the use of artificial intelligence technologies.

No generative artificial intelligence technologies were used in the creation of this article.

Data availability.

All data obtained during this study are included in the published article.

Микробиом почв различных ампелоценозов

© 2026 г. Н. В. Кондратюк¹, И. Л. Астапчук¹, Д. Н. Гладченко¹,
Н. А. Кузнецова¹, О. С. Смолич¹, Н. Я. Ребух^{2,3*}

¹Кубанский государственный аграрный университет
имени И. Т. Трубилина”, Россия,
350044, Краснодар, ул. Калинина, 13.

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

*<https://orcid.org/0000-0002-8621-6595>, e-mail: rebukh-nya@rudn.ru.

³Российский Университет Дружбы Народов, Россия,
117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6.

Поступила в редакцию 21.05.2025, после доработки 02.03.2026,
принята к публикации 21.08.2026

Резюме: Виноград занимает значительное место в мировом сельском хозяйстве, а успешное его возделывание зависит от микробиологического состава почвы, который влияет на ее плодородие и здоровье растений. Целью исследования было изучение структурной организации микробиома почв под виноградом различного типа. Для анализа микробиома почвы были отобраны образцы из ризосферной и неризосферной зон дикого винограда: бурых лесных и аллювиальных луговых. А также была изучена почва ампелографической коллекции Кубанского ГАУ – чернозем выщелоченный (центральная зона

Краснодарского края). В исследовании использовались методы последовательных разведений и посева на питательные среды для идентификации микроорганизмов. Анализ включал определение численности фитопатогенных грибов и бактерий: аммонификаторов, азотфиксаторов, целлюлозоразрушающих бактерий, нитрификаторов и денитрификаторов. Также проводился агрохимический анализ почв, включающий определение гумуса, нитратного азота, фосфора и калия. В почвенных образцах аллювиальных луговых нативного ценоза было выделено самое большое количество микромицетов и аммонификаторов. В условиях нативного ценоза бурых лесных почв была отмечена наибольшая численность азотфиксаторов, целлюлозоразрушающих бактерий, нитрификаторов и денитрификаторов. Агрохимический анализ выявил значительные различия в удельной электропроводности, содержании гумуса, нитратного азота, фосфора и калия между образцами. Корреляционный анализ позволил выявить ряд взаимосвязей между агрохимическими показателями и количеством микромицетов почвенных образцов. Была выявлена сильная прямая взаимосвязь между КОЕ бактерий и агрохимическими параметрами ($R = 0.92$) и слабая взаимосвязь между показателями грибов и бактерий ($R = -0.056$). В целом отмечена тенденция снижения количества и разнообразия микроорганизмов в ампелоценозе по сравнению с нативными ценозами винограда.

Ключевые слова: виноград; почвенный микробиом; грибы; бактерии; MALDI-TOF.

Microbiome of ampelocenoses of various soil types

© 2026 N. V. Kondratyuk¹, I. L. Astapchuk¹, D. N. Gladchenko¹,
N. A. Kuznetsova¹, O. S. Smolich¹, N. Y. Rebouh^{2,3*}

¹Kuban State Agrarian University named after I. T. Trublin,
13 Kalinina str., Krasnodar 350044", Russian Federation.

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

*<https://orcid.org/0000-0002-8621-6595>, e-mail: rebukh-nya@rudn.ru.

³Environmental Engineering Institute of RUDN University,
6 Miklukho-Maklaya St., Moscow 117198, Russian Federation.

Received 21.05.2025, Revised 02.03.2026, Accepted 21.08.2026

Abstract: Grapes hold a prominent position in global agriculture, and their successful cultivation is closely related to the microbiological composition of

the soil, which influences both fertility and plant health. This study aimed to investigate the structural organization of the soil microbiome in different grape-growing soils. Soil samples were collected from both the rhizosphere and non-rhizosphere zones of wild grape plants growing on brown forest and alluvial meadow soils. Additionally, soil from the ampelographic collection of the Kuban State Agrarian University characterized as leached chernozem, sampled in the central zone of the Krasnodar Krai, was examined. Microorganisms were identified using serial dilution techniques followed by culturing on selective media. The analysis focused on quantifying key microbial groups, including phytopathogenic fungi, ammonifying bacteria, nitrogen fixers, cellulolytic bacteria, nitrifiers, and denitrifiers. An agrochemical assessment of the soils was also conducted, measuring parameters such as humus content, nitrate nitrogen, available phosphorus, and potassium levels. The highest numbers of micromycetes and ammonifying bacteria were isolated from soil samples of native alluvial meadow cenoses. In contrast, native brown forest soils harbored the greatest abundance of nitrogen-fixing, cellulolytic, nitrifying, and denitrifying microorganisms. Agrochemical analysis revealed significant differences among the samples in electrical conductivity, humus content, nitrate nitrogen, phosphorus, and potassium concentrations. Correlation analysis identified several relationships between agrochemical properties and microbial abundance. A strong positive correlation was found between bacterial colony-forming units (CFUs) and agrochemical parameters ($R = 0.92$), while a weak negative correlation was observed between fungal and bacterial populations ($R = -0.056$). Overall, a reduction in both the abundance and diversity of soil microorganisms was noted in cultivated ampelocenoses compared to native grape cenoses.

Keywords: grapes; soil microbiome; fungi; bacteria; MALDI-TOF.

ВВЕДЕНИЕ

Среди плодовых и ягодных культур виноград занимает лидирующую позицию по объему производства (Наджи-Недфи et al., 2025). Выращиванием винограда занимаются 75 стран мира. На долю винограда приходится около 32.5% от общего объема мировой продукции садоводства. При этом свыше 80% урожая используется для производства вина, около 10–12 % потребляется в свежем виде, а 5% перерабатывается в сушеную продукцию – изюм и кишмиш (Зармаев, 2020).

Значение выращивания винограда важно для экономики, которое заключается в том, что культура винограда возможна на та-

ких землях, которые малопригодны для возделывания других растений, например, на каменистых почвах, крутых склонах, песчаных землях. Благодаря относительной засухоустойчивости виноградная лоза может произрастать в пустынных и полупустынных местностях. Помимо данных почв, виноград выращивают на легких по гранулометрическому составу почвах: суглинистые, песчаные, которые содержат большое количество щебня, хряща, камней. Виноград хорошо растет в широких пределах pH почвенной среды от 5.0 до 8.8, но экологический оптимум составляет 6.5–8.5 (Шеуджен и др., 2013).

Для успешного выращивания винограда на почвах по различному гранулометрическому составу, агрохимическим и агрофизическим параметрам, необходимо обращать внимание также и на состав почв по присутствию в них микроорганизмов различного происхождения, включая бактерии и патогенные микромицеты, так как их концентрация и видовой состав могут оказывать существенное влияние на плодородие почв (Коба и др., 2025; Ould Amer et al., 2023).

По мере того, как виноградарство все больше основывается на понимании микробных сообществ в почве, исследования все чаще сосредотачиваются на том, какие факторы, включая методы ведения виноградников и географическое расположение, формируют состав этих сообществ, особенно в отношении патогенных микромицетов и бактерий. Микробиом почв виноградников включает разнообразные виды микроорганизмов, среди которых присутствуют как патогенные, так и супрессивные грибы и бактерии. Микрофлора почв может включать в себя патогенные грибы, такие как *Fusarium* spp. (Link.), *Cephalosporium* sp., и *Rhizopus* sp. Ehrenb (Reboun et al., 2020). Данные микромицеты могут наносить вред виноградной лозе, вызывая заболевания корневой системы, листьев и стеблей. *Fusarium* spp. активно развивается на почвах, где ранее росли такие культуры, как кукуруза и сахарная свекла, а также на полях севооборота, свободных от возделывания культур (Morales-Castilla et al., 2023). Постоянное присутствие этих грибов приводит к накоплению инфекций, что создает риск для фитосанитарного состояния виноградников (Россельхозцентр, 2024). Кроме патогенных, в почве обнаруживаются сапротрофные грибы,

такие как *Aspergillus* sp. (Micheli ex Haller) и *Penicillium* sp. (Link), которые при значительном накоплении вызывают “утомление почвы” и снижают ее качество. Грибы рода *Trichoderma* Pers. способствуют оздоровлению почвы, улучшают разложение растительных остатков и снижают патогенную нагрузку, особенно если применяются препараты-деструкторы. Также основными и преобладающими родами, обитающими в почвах винограда, являются микромицеты родов *Alternaria* Nees, *Verticillium* Kleb., *Mucor* Fresen., которые также могут играть значительную роль, участвуя в разложении органических веществ, но при этом могут представлять угрозу, вызывая различные заболевания виноградной лозы (Лукиянов, 2020).

В дополнение к грибам микробное сообщество обогащено бактериями рода *Pseudomonas* Migula, которые, как и другие микроорганизмы, играют важную роль в азотном обмене и фитостимуляции растений (Семенов, 2025). Также отмечается разнообразие бактерий, включая азотфиксирующие, аммонификаторы и целлюлозоразрушающие микроорганизмы, которые играют важную роль в поддержании плодородия почвы. Например, актиномицеты, такие как *Streptomyces* Waksman and Henrici и *Nocardia* Trevisan, участвуют в минерализации органического вещества и структурировании почвы, особенно в местах, где предшественниками были бобовые культуры (Россельхозцентр, 2024; Завьялова и др., 2022). Благодаря способности метаболизировать сложные органические соединения микроорганизмы *Arthrobacter* sp. играют важную роль в разложении органического вещества, поддерживая устойчивое агроэкологическое состояние почвы (Волынчук и др., 2022).

Исследования показывают, что патогенные микромицеты широко распространены в почвах виноградников и могут сохраняться там длительное время, представляя постоянную угрозу здоровью растений. В своей работе Brilhante et al. (Brilhante et al., 2017) описали устойчивость *Fusarium* и *Phytophthora* de Bary в почвах виноградников, подчеркивая их способность выживать в различных условиях. Дальнейшие исследования Makádi et al. (Makádi et al., 2022) показали, что методы ведения сельского хозяйства, такие как внесение органических удобрений и сокраще-

ние механической обработки почвы, могут влиять на распространённость этих грибов. Их исследования показали, что определённые агротехнические подходы, включая добавление органического вещества и снижение использования химических средств, способствуют формированию более разнообразного микробного сообщества, которое способно подавлять рост патогенных микроорганизмов.

Географическое положение также играет важную роль в составе почвенных микробных сообществ. Lundberg и др. (Lundberg et al., 2015) продемонстрировали, что разнообразие микроорганизмов в почвах виноградников определяется не только физико-химическими характеристиками почвы, но и климатическими условиями окружающей среды. Это исследование показало, что в регионах с высокой влажностью и частыми осадками преобладают патогены, такие как *Phytophthora* и *Pythium* Pringsheim, в то время как в засушливых районах чаще встречаются грибы рода *Fusarium*. Таким образом, климатические условия региона оказывают решающее влияние на состав патогенных микромицетов.

Баланс между полезными и патогенными микроорганизмами в почве виноградников является сложным взаимодействием. Некоторые микробные таксоны обладают способностью естественным образом подавлять развитие патогенов. Hill и др. (Hill et al., 2021) ввели концепцию “микробного терруара”, согласно которой микробиом почвы не только оказывает прямое влияние на здоровье лозы, но и может выступать в качестве естественного барьера против почвенных патогенов. Это подтверждается исследованиями Ruiz и Portillo (Ruiz, Portillo, 2022), которые изучали взаимодействие между подвоями виноградной лозы и микробиомом почвы. Они установили, что некоторые подвои способствуют развитию полезных микробных сообществ, способных ингибировать рост патогенных грибов, предлагая тем самым экологически безопасный метод борьбы с почвенными заболеваниями без использования химикатов.

Методы ведения виноградников, особенно выбор между органическим и традиционным виноградарством, также оказывают значительное влияние на микробиом почвы. Perazzolli et al. (Perazzolli et al., 2023) сравнили микробиомы органических и тра-

диционных виноградников и обнаружили, что органическое земледелие способствует большему разнообразию почвенных микроорганизмов, что, в свою очередь, снижает распространенность патогенных грибов. Органические методы, такие как использование зеленого удобрения и севооборот, способствуют развитию полезных бактерий и грибов, которые конкурируют с патогенами и подавляют их рост. В то же время традиционные методы часто приводят к сокращению биоразнообразия почвы, что способствует доминированию патогенов, таких как *Fusarium* и *Rhizoctonia*.

В связи с выше сказанным, изучение микробиома почв винограда является актуальным. **Целью исследований было изучение структурной организации микробиома различных типов почв винограда и их агрохимических показателей.**

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Отбор почвенных образцов проведен в зоне произрастания дикого винограда и ампелографической коллекции в следующих точках (табл. 1) малогабаритным буром конструкции С.Ф. Неговцова по профилю до глубины 0–20 см методом конверта с формированием объединенной пробы.

Анализ микробиома почвы винограда проводился методом последовательных разведений до –6-й степени. С предельной степени разведения производим газонный посев почвенной суспензии в объеме 250 мкл на плотные питательные среды (Эшби; Гетчинсона и Клейтона; ГРМ) при помощи шпателя Дригальского. Для идентификации микромицетов в почвенной суспензии посев производился с –3-й степени на картофельно-глюкозный агар с добавлением 10%-ной лимонной кислоты (табл. 1). Посев каждого разведения проводился в трех повторностях (3 чашки Петри для твердых питательных сред и 3 пробирки для жидких сред) для каждого смешанного образца. Инкубация 3–7 дней при $t = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Число колониеобразующих единиц на грамм сухой почвы (КОЕ/г) определено методом последовательных разведений. Подсчет количества пропагул или КОЕ бактерий и грибов на 1 г воздушно-сухой почвы рассчитывали по формуле 1:

$$X = (a \times c) : (v \times m), \quad (1)$$

где a – среднее количество колоний на чашке Петри;
 v – объем наносимой суспензии;
 c – разведение почвенной суспензии;
 m – вес почвы, взятой для анализа.

Посев на жидкие питательные среды проводился методом внесения почвенной суспензии объемом 555 мкл с –4-й и –5-й степенями разведения в пробирки с целью идентификации бактерий нитрификаторов 1-й и 2-й фазы, целлюлозоразлагающих аэробных и анаэробных бактерий и денитрификаторов.

Таблица 1. Типы почв и места отбора образцов (2024)

Table 1. Soil types and sampling sites (2024)

Тип почвы	Место отбора проб		Координаты
Бурые лесные насыщенные глинистые на делювиальных глинах (Крымский район, хутор Даманка)	1	Куст 1.1	44°57'53.3"N 37°46'43.2"E
	2	Куст 1.2	44°57'50.8"N 37°46'35.6"E
	3	Куст 1.3	44°57'58.8"N 37°47'54.8"E
	4	Куст 2	44°96'49.22"N 37°77'83.05"E
Аллювиальные луговые пойменные среднесуглинистые на аллювиальных суглинках (Абинский район, хутор Нечаевский)	5	Куст 2.2	45°09'30.2"N 38°17'08.4"E
	6	Куст 2.4	45°09'33.3"N 38°17'06.0"E
	7	Куст 2.5	45°09'34.4"N 38°17'05.8"E
	8	Куст 2.6	45°09'38.1"N 38°17'04.8"E
Чернозем выщелоченный малогумусный сверхмощный на лессовидных суглинках (Учебно-опытное хозяйство “Кубань”, Краснодар)	9	Ампелографическая коллекция КубГАУ	45°06'41.02"N 38°86'84.24"E

Посевы инкубировались при $t = 25\text{--}30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 2–3 недели. Через 2 недели после посева возбудителей I фазы нитрификации проведена реакция на аммоний с реактивом Несслера (раствор дигидрата тетраиодомеркурата калия ($\text{K}_2[\text{HgI}_4] \times 2\text{H}_2\text{O}$) в щелочной среде), а на азотистую кислоту – с реактивом Грисса (смесь 1-нафтиламина, сульфаниловой кислоты и винной кислоты). При изучении возбудителей II фазы нитрификации проведена реакция на азотистую кислоту с реактивом Грисса, при ее отсутствии – на азотную кислоту с дифениламином (несколько кристаллов дифениламина помещалось в концентрированную серную кислоту – 2–3 капли на предметном стекле – и добавляется несколько капель культуральной жидкости). Определение продуктов восстановления нитратов в процессе денитрификации проведено с помощью реактива Грисса.

Первичное определение выделенных штаммов микромицетов производилось с использованием микроскопов Olympus BX41 AXIO SCOPE. A1, PZO WARSZAWA SK14 06142, а также отечественной и зарубежной определительной литературы (Пидопличко; Саттон).

Идентификацию изолятов проводили методами исследования морфологических и тинкториальных свойств и масс-спектрометрии с использованием масс-спектрометра MALDI-TOF MS (“BactoSCREEN, Литех”, Россия) по белковым профилям (Agustini et al., 2018) на базе центра биотехнологий Кубанского ГАУ.

Агрохимический анализ образцов почв проводился согласно общепринятым ГОСТам: ГОСТ 26423-85; ГОСТ 28268-89; ГОСТ 26213-91; ГОСТ 26951-86; ГОСТ 26295-91. Для проведения анализа были использованы смеси образцов 3 точек отбора почвы:

- 1) бурые лесные (смесь образцов 1–4);
- 2) аллювиальные луговые (смесь образцов 5–8);
- 3) чернозем выщелоченный (образец 9).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате исследований микробиоты различных типов почв на питательных средах были выделены колонии микромицетов (36 штаммов). Патогенные и условно-патогенные грибы были

представлены 12 родами, среди которых основу составляли представители *Aspergillus* sp. P. Micheli ex Haller, (1768), *Penicillium* sp. Link, (1809) и других (рис. 1).



Образец 6, аллюви-
альная луговая

Образец 4,
бурая лесная

Образец 9,
чернозем выщелочен-
ный

Рис. 1. Микромицеты почвенной микробиоты анализируемых участков (КГА).

Fig. 1. Micromycetes of the soil microbiota according to the analyzed sites (PGA).

Общая численность микромицетов варьировала от 2 млн КОЕ/г в черноземе выщелоченном до 4.9 млн КОЕ/г в бурых лесных почвах (табл. 2). Видовое разнообразие, напротив, было максимальным в черноземе (12 видов) и минимальным в бурых лесных (7 видов).

Численность аммонификаторов (рис. 2, табл. 3) была максимальной в бурых лесных почвах (до 3.8×10^9 КОЕ/г), что свидетельствует о наиболее активных процессах минерализации органического вещества в данном типе почв.

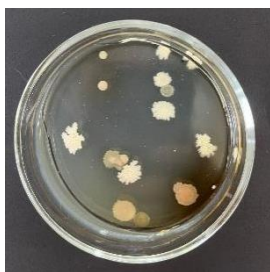
Численность азотфиксаторов и целлюлозолитиков (табл. 3) была максимальной в аллювиально-луговых почвах (6.4×10^7 и 9.2×10^7 КОЕ/г соответственно), что коррелирует с высоким содержанием органического вещества в данном типе почвы.

Таблица 2. Количество микромицетов различных типов почв
Table 2. The number of micromycetes according to soil types

Образцы		КОЕ
Бурые лесные насыщенные глинистые на делювиальных глинах (Крымский район, хутор Даманка)	1	4×10^5
	2	1.2×10^5
	3	1.6×10^5
	4	1.2×10^5
Аллювиальные луговые пойменные среднесуглинистые на аллювиальных суглинках (Абинский район, хутор Нечаевский)	5	1.2×10^5
	6	2.2×10^5
	7	1.7×10^6
	8	4×10^4
Чернозем выщелоченный малогумусный сверхмощный на лессовидных суглинках (Учебно-опытное хозяйство “Кубань”, Краснодар)	9	2×10^5



Образец 5, аллювиальная луговая



Образец 4, бурая лесная



Образец 9, чернозем выщелоченный

Рис. 2. Аммонификаторы почвенной микробиоты анализируемых участков (ГРМ).

Fig. 2. Ammonifiers of the soil microbiota according to the analyzed sites.

Таблица 3. Численность и групповой состав микрофлоры различных типов почв, 2024 г., тыс/г сухой почвы
Table 3. Abundance and group composition of microflora according to the various soil types, 2024, thousand/g of dry soil

Образец		Аммонификаторы	Азотфиксаторы	Целлюлолитики	Нитрификаторы		Денитрификаторы
					Фаза 1	Фаза 2	
Бурая лесная	1	3.8×10^9	4×10^6	5.2×10^7	6.8×10^7	$< 1 \times 10^4$	1×10^4
	2	7.2×10^7	4×10^6	2×10^7	4×10^6	$< 1 \times 10^4$	$< 1 \times 10^4$
	3	4×10^6	1.2×10^7	4×10^6	2×10^7	$< 1 \times 10^4$	$< 1 \times 10^4$
	4	7.6×10^7	1.2×10^7	3.6×10^7	1.2×10^7	$< 1 \times 10^4$	1×10^4
Аллювиальная луговая	5	1.2×10^8	1.2×10^7	4×10^6	1.2×10^7	$< 1 \times 10^4$	1×10^4
	6	1.2×10^7	2.4×10^7	2.8×10^7	1.2×10^7	$< 1 \times 10^4$	$< 1 \times 10^4$
	7	3.2×10^9	1.7×10^8	9.2×10^7	4×10^8	$< 1 \times 10^4$	1×10^5
	8	5.6×10^7	5.2×10^7	5.2×10^7	4×10^6	$< 1 \times 10^4$	$< 1 \times 10^4$
Чернозем выщелоченный		3.6×10^7	3.6×10^7	8×10^6	1×10^7	$< 10^4$	1×10^4

Численность нитрификаторов 1-й фазы достигала 6.8×10^7 в бурых лесных почвах. Тогда как нитрификации 2-ой фазы, так же как и денитрификаторы в подавляющем большинстве образцов, находились на уровне предела обнаружения метода ($< 1 \times 10^4$). Лишь в одном образце аллювиально-луговой почвы (образец 8) численность денитрификаторов составила 1×10^5 . Полученные данные свидетельствуют о низкой активности на завершающих этапах нитрификации и процесса денитрификации в исследованных почвах, что может быть связано с недостатком кислорода субстрата или иными лимитирующими факторами.

Значения $< 1 \times 10^4$ КОЕ/г соответствуют пределу обнаружения культурального метода и отражают лишь культивируемую долю микробного сообщества, что не позволяет напрямую интерпретировать их как низкую общую микробную активность.

Максимальное видовое разнообразие бактерий выявлено в бурых лесных почвах (13 видов, 28 штаммов), минимальное – в аллювиально-луговых (5 видов, 14 штаммов) (табл. 4). Во всех типах почв доминировали спорообразующие бактерии родов *Bacillus* и *Priestia*. Видовая структура различалась: в бурых лесных преобладали *Bacillus cereus* и *Peribacillus simplex*, в черноземе и аллювиальных почвах – *Priestia megaterium*. Среди доминантов присутствуют виды, значимые для биоконтроля и биотехнологии.

По общей численности и видовому составу бактерий в целом нативные ценозы отличались незначительно. Данные по численности микромицетов изученных участков имели тенденцию снижения количества и разнообразия микроорганизмов в ампелоценозе по сравнению с нативными ценозами винограда.

Также в ходе исследования был проведен агрохимический анализ почв (табл. 5), включающий определение удельной электропроводности, гумуса, содержание нитратного азота (N-NO_3), фосфора (P_2O_5) и калия (K_2O) по Мачигину.

Агрохимический анализ (табл. 5) выявил следующие межвидовые различия:

- аллювиально-луговые почвы: максимум гумуса (6.87%) и подвижного фосфора (69.7 мг/кг);
- бурые лесные почвы: максимум калия (546.8 мг/кг) и электропроводности (0.153 мСм/см);

Таблица 4. Видовой состав бактерий почвенных образцов, 2024

Table 4. Bacterial species composition of soil samples, 2024

Вид	Бурые лесные насыщенные глинистые на делювиальных глинах (Крымский район, хутор Даманка)	Аллювиальные луговые пойменные среднесуглинистые на аллювиальных суглинках (Абинский район, хутор Нечаевский)	Чернозем выщелоченный малогумусный сверхмощный на лесовидных суглинках (Учебно-опытное хозяйство “Кубань”, Краснодар)
<i>Bacillus cereus</i>	++++++	++++	_*
<i>Peribacillus simplex</i>	++++++	++	++
<i>Priestia megaterium</i>	+++	+++++	+++++
<i>Bacillus pumilus</i>	+++	-	++
<i>Bacillus thuringiensis</i>	++	+	-
<i>Bacillus mycoides</i>	+	-	-
<i>Tsukamurella paurometabola</i>	+	-	-
<i>Acinetobacter lwoffii</i>	+	-	-
<i>Bacillus subtilis</i>	+	-	-
<i>Bacillus mojavensis</i>	+	-	-

Продолжение таблицы 4

Table 4 continued

Вид	Бурые лесные насыщенные глинистые на делювиальных глинах (Крымский район, хутор Даманка)	Аллювиальные луговые пойменные среднесуглинистые на аллювиальных суглинках (Абинский район, хутор Нечаевский)	Чернозем выщелоченный малогумусный сверхмощный на лесовидных суглинках (Учебно-опытное хозяйство “Кубань”, Краснодар)
<i>Alishewanella fetalis</i>	+	-	-
<i>Alishewanella fetalis</i>	+	-	-
<i>Solibacillus silvestris</i>	+	-	-
<i>Exiguobacterium aurantiacum</i>	+	-	-
<i>Metabacillus idriensis</i>	-	+	-
<i>Lysinibacillus</i> sp	-	+	-
<i>Pseudarthrobacter oxydans</i>	-	++	-
<i>Bacillus muralis</i>	-	+	-

Продолжение таблицы 4
Table 4 continued

Вид	Бурые лесные насыщенные глинистые на делювиальных глинах (Крымский район, хутор Даманка)	Аллювиальные луговые пойменные среднесуглинистые на аллювиальных суглинках (Абинский район, хутор Нечаевский)	Чернозем выщелоченный малогумусный сверхмощный на лесовидных суглинках (Учебно-опытное хозяйство “Кубань”, Краснодар)
<i>Arthrobacter globiformis</i>	-	+	-
<i>Peribacillus simplex</i>	-	+	-
<i>Priestia megaterium</i>	-	+	-

Примечание. * – организм не обнаружен.

Note. * – organism was not detected.

Таблица 5. Агрохимические показатели почвенных образцов анализируемых участков, 2024 г.

Table 5. Agrochemical parameters of soil samples according to the analyzed sites, 2024

Образец	Удельная электропровод- ность, мСм/см	N-NO ₃ , мг/кг	Гумус, %	P ₂ O ₅ , мг/кг	K ₂ O, мг/кг
				По Мачигину	
Аллювиальная луговая	0.152 ± 0.008	10.90 ± 4.989	6.87 ± 1.124	69.7 ± 2.643	484.4 ± 12.774
Бурая лесная	0.153 ± 0.010	11.47 ± 3.205	5.27 ± 0.83	43.8 ± 9.54	546.8 ± 25.2
Чернозем вы- щелоченный	0.080 ± 0.015	16.40 ± 1.352	2.65 ± 0.012	54.3 ± 0.451	357.0 ± 5.886

- чернозем выщелоченный: максимум нитратного азота (16.40 мг/кг) при минимуме гумуса (2.65%).

Наибольшая изменчивость (по стандартному отклонению) наблюдается по гумусу и калию в аллювиальной луговой и бурой лесной почвах, что указывает на их высокую пространственную гетерогенность. В черноземе выщелоченном показатели более стабильны. Агрохимические показатели представлены по объединенным пробам и отражают фоновые характеристики участков.

Линейный коэффициент корреляции между КОЕ грибов и КОЕ бактерий (аммонификаторы) (рис. 3) равен $R = -0.056$, что указывает на очень слабую отрицательную связь.

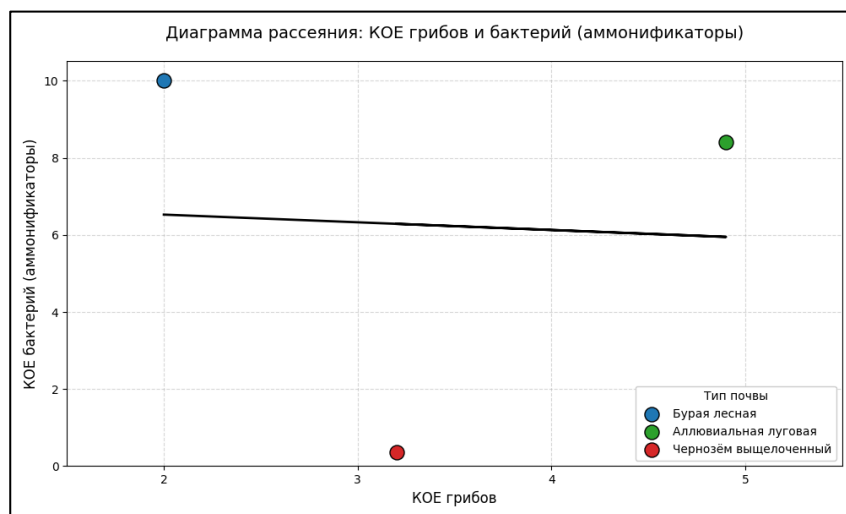


Рис. 3. Коэффициент корреляции между КОЕ грибов и КОЕ бактерий (аммонификаторы).

Fig. 3. Correlation coefficient between CFU of fungi and CFU of bacteria (ammonifiers).

Это означает, что статистически значимой зависимости между количеством грибов и бактерий в исследуемых образцах не наблюдается. Аллювиальная луговая почва демонстрирует наиболее благоприятные условия для развития как грибов, так и бакте-

рий (аммонификаторов), что подтверждается высокими значениями КОЕ для обоих показателей. Бурая лесная почва имеет благоприятные условия для развития бактерий (аммонификаторов), но менее благоприятные для развития грибов, что видно по низкому значению КОЕ грибов. Чернозем выщелоченный показывает оптимальные условия для развития грибов, но наименее благоприятные для бактерий (аммонификаторов) по сравнению с другими районами.

Линейный коэффициент корреляции между каноническими переменными КОЕ бактерий и агрохимическими показателями (рис. 4) составляет $R = 0.92$ и отражает зависимость между показателями в пределах имеющейся выборки ($n = 3$), что может свидетельствовать о наличии выраженной тенденции к прямой связи между этими параметрами в исследованных образцах. Учитывая ограниченное число независимых точек, данный результат следует рассматривать как предварительное наблюдение, требующее подтверждения на расширенной выборке.

Бурые лесные и аллювиальные луговые почвы демонстрируют наиболее благоприятные условия для развития микроорганизмов, что подтверждается высокими значениями КОЕ бактерий и агрохимических показателей. Чернозем выщелоченный показывает наименьшие значения как для КОЕ бактерий, так и для агрохимических показателей, что может указывать на менее благоприятные условия для развития микроорганизмов.

В данном исследовании был проведен анализ микробиома почв нативного ценоза винограда бурых лесных насыщенных глинистых на делювиальных глинах (Крымский район, хутор Даманка) и аллювиальных луговых пойменных среднесуглинистых на аллювиальных суглинках (Абинский район, хутор Нечаевский), также почв ампелографической коллекции – чернозема выщелоченного малогумусного сверхмощного на лессовидных суглинках. Основные результаты показали, что в аллювиальных луговых почвах нативного ценоза было выделено наибольшее количество микромицетов и аммонификаторов, тогда как в бурых лесных почвах наблюдалась высокая численность азотфиксаторов, целлюлозоразрушающих бактерий, нитрификаторов и денитрификаторов.

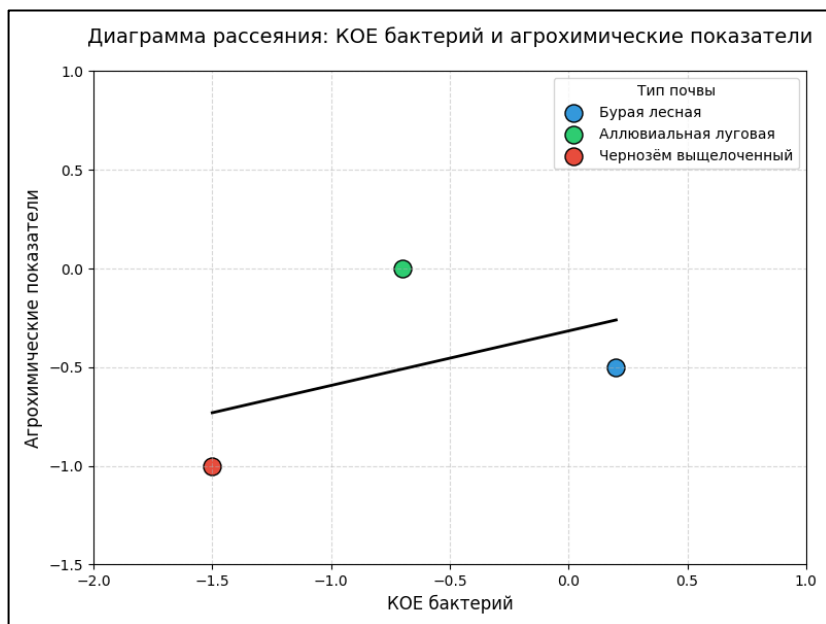


Рис. 4. Коэффициент канонической корреляции между КОЕ бактерий и агрохимическими показателями.

Fig. 4. Coefficient of canonical correlation between CFU of bacteria and agrochemical indicators.

Следует учитывать, что культуральный метод позволяет оценить лишь культивируемую часть микробного сообщества. Значительная доля микроорганизмов остается некультивируемой и не отражается в показателях КОЕ, что ограничивает интерпретацию полученных результатов.

Результаты данного исследования согласуются с предыдущими работами, которые также подчеркивают важность микробиома почвы для плодородия и здоровья растений. Например, исследования Lundberg et al. (2015) и Yeoh et al. (2020) показали, что состав почвенных микроорганизмов сильно зависит от географического положения и климатических условий, что подтверждается нашими данными о различиях в микробиоме между бурыми лес-

ными и аллювиальными луговыми почвами. Кроме того, наши результаты о высокой численности азотфиксаторов и целлюлозоразрушающих бактерий в образцах бурых лесных почвах согласуются с исследованиями Brillhante et al. (2017), которые также отмечали важность этих микроорганизмов для поддержания плодородия почвы.

Однако наши данные о снижении разнообразия микроорганизмов в ампелоценозе, по сравнению с нативными ценозами, несколько расходятся с результатами Perazzolli et al. (2023), которые обнаружили, что органическое земледелие способствует большему разнообразию почвенных микроорганизмов. Это может быть связано с различиями в методах ведения виноградников или с особенностями исследуемых зон.

Полученные результаты могут быть объяснены различиями в агрохимических и климатических условиях между исследуемыми районами. Например, более высокая численность азотфиксаторов в образцах бурых лесных почв может быть связана с более благоприятными условиями для азотфиксации, такими как оптимальный уровень влажности и температуры. Высокое содержание гумуса в образцах аллювиальных луговых почв может способствовать активному разложению органических веществ, что объясняет большое количество аммонификаторов.

Полученные результаты могут служить основой для дальнейших исследований виноградарства, так как они подчеркивают необходимость учета микробиологического состава почвы при выборе методов ведения виноградников. Понимание взаимосвязей между микробиомом почвы и агрохимическими параметрами может помочь в разработке более эффективных стратегий управления почвенным здоровьем и повышения урожайности винограда.

Данное исследование предоставляет важные данные о структурной организации микробиома почв нативного ценоза винограда и его взаимосвязи с агрохимическими параметрами. Результаты подчеркивают значимость микробиологического состава почвы для успешного выращивания винограда и указывают на необходимость дальнейших исследований в этой области. Наши данные могут быть использованы для разработки более эффективных стратегий управления фитосанитарным состоянием почвы,

что в конечном итоге будет способствовать повышению урожайности и устойчивости виноградников.

ВЫВОДЫ

В результате проведенной работы были достигнуты следующие ключевые результаты: в аллювиальных луговых почвах зафиксирована максимальная численность микромицетов (3.2 млн КОЕ/г) и аммонификаторов (3.2×10^9 КОЕ/г), что коррелирует с высоким содержанием гумуса (6.87%). Для бурых лесных почв характерна повышенная активность азотфиксирующих (1.2×10^7 КОЕ/г), целлюлозолитических (5.2×10^7 КОЕ/г) и нитрифицирующих (6.8×10^7 КОЕ/г) микроорганизмов. Чернозем выщелоченный ампелографической коллекции отличается сниженным микробным разнообразием (2 млн КОЕ/г) и доминированием ограниченного числа видов (*Priestia megaterium*).

Выявлены различия агрохимических показателей: аллювиальные почвы характеризуются максимальным содержанием гумуса (6.87%) и подвижного фосфора (69.7 мг/кг). Бурые лесные почвы демонстрируют наивысшие значения калия (546.8 мг/кг) и электропроводности (0.153 мСм/см). Чернозем выщелоченный выделяется повышенным содержанием нитратного азота (16.4 мг/кг) при минимальных показателях гумуса (2.65%).

Корреляционный анализ выявил слабую отрицательную связь между численностью грибов и бактерий ($R = -0.056$). При анализе трех интегральных проб почвы наблюдалась тенденция к прямой зависимости ($R = 0.92$) между количеством бактерий и агрохимическими параметрами, что требует дополнительной проверки.

В исследованных условиях наблюдается тенденция к более высоким значениям показателей нативных ценозах (в 1.5–2 раза). Однако различия могут быть обусловлены комплексом факторов (тип почвы, география, особенности землепользования) и требуют проверки на сопоставимых парах “ампелоценоз – нативный участок” в пределах одного района.

Разработка стратегий управления почвенным здоровьем на основе данных о микробиологическом составе почвы, позволит повысить урожайность и устойчивость виноградников. Получен-

ные результаты могут служить основой для дальнейших исследований научного сообщества и практики в виноградарстве, предлагая новые подходы к управлению почвенным здоровьем и повышению урожайности. Дальнейшие исследования в этой области могут способствовать развитию более устойчивых и экологически безопасных методов ведения сельского хозяйства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волынчук, Н.Н.; Жук, О.Н. Биоразнообразие микробного сообщества винограда культурного (*Vitis vinifera*). *Вестник Полесского государственного университета. Серия природоведческих наук* **2022**, (2), 8–28.
2. Завьялова, Н.Е.; Васбиева, М.Т.; Ямалтдинова, В.Р.; Шляпина, Я.В. Характеристика гуминовых кислот дерново-подзолистой почвы при длительном воздействии разных систем удобрения. *Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева* **2022**, (111), 97–115. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2022-111-97-115>.
3. Зармаев, А.А. *Виноградарство с основами технологии первичной переработки винограда*; Юрайт: Москва, 2020.
4. Шеуджен, А.Х.; Бондарева, Т.Н.; Кизинек, С.В. *Агрохимические основы применения удобрений*; ОАО “Полиграф ЮГ”: Майкоп, 2013.
5. Коба, В.П.; Новицкий, М.Л.; Пшеничников, Н.А.; Нагорняк, А.А. Почвенные условия биоценозов *Quercus pubescens* Willd. Южного берега Крыма. *Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева* **2025**, (125), 111–137. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2025-125-111-137>.
6. Лукьянов, А.А. Состав почвенных микромицетов при различной системе содержания почвы на виноградных насаждениях. *Вестник Казанского государственного аграрного университета* **2020**, (26), 59.
7. Семенов, М.В. Микробиологические показатели динамики почвенного углерода. *Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева* **2025**, (124), 116–143. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2025-124-116-143>.
8. ФГБУ Россельхозцентр. Микологический анализ почв в Краснодарском крае (2024). Результат микологического анализа почвы в хозяйствах Краснодарского края за 2 квартал 2024 года; ФГБУ “Россельхозцентр” по Краснодарскому краю.
9. Agustini, B.C.; Da Silva, G.A.; Bonfim, T.M.B. MALDI-TOF MS Supplementary Database for Species Identification Employing the Yeast Diversity Encountered on Southern Brazil Grapes. *Folia Microbiologica* **2018**, (63), 685–693.

10. Brilhante, I.; Patrícia, A.; António, A. From Vineyard Soil to Wine Fermentation: Microbiome Approaches to Wine Microbiology. *Frontiers in Microbiology* **2017**, (8), 821. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00821>.
11. Makádi, L.; Káta, Z.; Kónya, Z. Bacterial Community Structure Responds to Soil Management in the Vineyard. *Microorganisms* **2022**, (10), 989. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10050989>.
12. Hajji-Hedfi, L.; Wannassi, T.; Tawfeeq Al-Ani, L.K.; Balbool, B.A.; Tissaoui, S.; Mougou-Hamdane, A.; Hamdi, W.; Azeem, A.M.A.; Rebouh, N.Y. Investigating the Potential Role of Beneficial Rhizobacteria for Protecting Grapevine Health and Promoting Growth. *Frontiers in Sustainable Food Systems* **2025**, (9), 1619801. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2025.1619801>.
13. Hill, M.C.; Goddard, M.R.; Castle, M.J. Sources and Assembly of Microbial Communities in Vineyards as a Basis for the Concept of Microbial Terroir. *Frontiers in Microbiology* **2021**, (12), 673810. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.673810>.
14. Lundberg, Z.R.; Bowen, M.L.; Kistler, D.A.; Gilbert, J.A. The Soil Microbiome Influences Grapevine-Associated Microbiota. *mBio* **2015**, (6), e02527-14. <https://doi.org/10.1128/mBio.02527-14>.
15. Morales-Castilla, M.L.; García de Cortázar-Atauri, P.A.; Wolkovich, E.M. Effects of Vineyard Agro-Management Practices on Soil Bacterial Communities. *Soil Biology and Biochemistry* **2023**, (166), 108496. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108496>.
16. Ould Amer, S.; Aliat, T.; Kucher, D.E.; Bensaci, O.A.; Rebouh, N.Y. Investigating the Potential of Arbuscular Mycorrhizal Fungi in Mitigating Water Deficit Effects on Durum Wheat (*Triticum durum* Desf.). *Agriculture* **2023**, (13), 552. <https://doi.org/10.3390/agriculture13030552>.
17. Perazzolli, M.; Campisano, S.; Pertot, I. Organic vs. Conventional: Impact of Cultivation Treatments on the Soil Microbiota in Vineyards. *Frontiers in Microbiology* **2023**, (14), 1242267. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1242267>.
18. Rebouh, N.Y.; Latati, M.; Polityko, P.; Kucher, D.; Hezla, L.; Norezine, A.; Kalisa, L.; Utkina, A.; Vvedenskiy, V.; Gadzhikurbanov, A.; Ivanov, N. Influence of Three Cultivation Technologies to Control *Fusarium* spp. in Winter Wheat (*Triticum aestivum* L.) Production under Moscow Conditions. *Research on Crops* **2020**, (1), 17–25. <https://doi.org/10.31830/2348-7542.2020.003>.
19. Ruiz, M.A.; Portillo, M.C. Grapevine Rootstock and Soil Microbiome Interactions: Keys for a More Sustainable Viticulture. *Horticulturae* **2022**, (8), 254. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8040254>.

20. Yeoh, Y.K.; Dennis, P.G.; Hugenholtz, P. Wine Terroir and the Soil Bacteria: An Amplicon Sequencing–Based Assessment. *Frontiers in Microbiology* **2020**, (11), 597944. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.597944>.

REFERENCES

1. Volynchuk, N.N.; Zhuk, O.N. Biodiversity of the Microbial Community of Cultivated Grapes (*Vitis vinifera*). *Bulletin of Polessky State University. Series of Natural Sciences* **2022**, (2), 8–28. (In Russ.)
2. Zavyalova, N.E.; Vashieva, M.T.; Yamaltdinova, V.R.; Shlyapina, Ya.V. Characteristics of Humic Acids in Sod-Podzolic Soil under Long-Term Exposure to Different Fertilization Systems. *Dokuchaev Soil Bulletin* **2022**, (111), 97–115. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2022-111-97-115> (In Russ.)
3. Zarmaev, A.A. *Viticulture with the Basics of Primary Grape Processing Technology*; Yurayt: Moscow, 2020. (In Russ.)
4. Sheudjen, A.H.; Bondareva, T.N.; Kizinek, S.V. *Agrochemical Foundations of Fertilizer Application*; JSC Polygraph YUG: Maykop, 2013. (In Russ.)
5. Koba, V.P.; Novitsky, M.L.; Pshenichnikov, N.A.; Nagorniyak, A.A. Soil Conditions of Biocenoses *Quercus pubescens* Willd. of the Southern Coast of Crimea. *Dokuchaev Soil Bulletin* **2025**, (125), 111–137. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2025-125-111-137> (In Russ.)
6. Lukyanov, A.A. Composition of Soil Micromycetes with Different Soil Content Systems in Grape Plantations. *Vestnik of Kazan State Agrarian University* **2020**, (26), 59. (In Russ.)
7. Semenov, M.V. Microbiological Indicators of Soil Carbon Dynamics. *Dokuchaev Soil Bulletin* **2025**, (124), 116–143. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2025-124-116-143> (In Russ.)
8. FGBU Rosselkhoz nadzor. Mycological Analysis of Soils in the Krasnodar Region (2024). The Result of Mycological Analysis of Soil in Farms of the Krasnodar Territory for the 2nd Quarter of 2024; Federal State Budgetary Institution “Rosselkhoz nadzor” in the Krasnodar Territory. (In Russ.)
9. Agustini, B.C.; Da Silva, G.A.; Bonfim, T.M.B. MALDI-TOF MS Supplementary Database for Species Identification Employing the Yeast Diversity Encountered on Southern Brazil Grapes. *Folia Microbiologica* **2018**, (63), 685–693.
10. Brilhante, I.; Patrícia, A.; António, A. From Vineyard Soil to Wine Fermentation: Microbiome Approaches to Wine Microbiology. *Frontiers in Microbiology* **2017**, (8), 821. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00821>.

11. Makádi, L.; Káta, Z.; Kónya, Z. Bacterial Community Structure Responds to Soil Management in the Vineyard. *Microorganisms* **2022**, (10), 989. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10050989>.
12. Hajji-Hedfi, L.; Wannassi, T.; Tawfeeq Al-Ani, L.K.; Balbool, B.A.; Tissaoui, S.; Mougou-Hamdane, A.; Hamdi, W.; Azeem, A.M.A.; Rebouh, N.Y. Investigating the Potential Role of Beneficial Rhizobacteria for Protecting Grapevine Health and Promoting Growth. *Frontiers in Sustainable Food Systems* **2025**, (9), 1619801. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2025.1619801>.
13. Hill, M.C.; Goddard, M.R.; Castle, M.J. Sources and Assembly of Microbial Communities in Vineyards as a Basis for the Concept of Microbial Terroir. *Frontiers in Microbiology* **2021**, (12), 673810. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.673810>.
14. Lundberg, Z.R.; Bowen, M.L.; Kistler, D.A.; Gilbert, J.A. The Soil Microbiome Influences Grapevine-Associated Microbiota. *mBio* **2015**, (6), e02527-14. <https://doi.org/10.1128/mBio.02527-14>.
15. Morales-Castilla, M.L.; García de Cortázar-Atauri, P.A.; Wolkovich, E.M. Effects of Vineyard Agro-Management Practices on Soil Bacterial Communities. *Soil Biology and Biochemistry* **2023**, (166), 108496. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108496>.
16. Ould Amer, S.; Aliat, T.; Kucher, D.E.; Bensaci, O.A.; Rebouh, N.Y. Investigating the Potential of Arbuscular Mycorrhizal Fungi in Mitigating Water Deficit Effects on Durum Wheat (*Triticum durum* Desf.). *Agriculture* **2023**, (13), 552. <https://doi.org/10.3390/agriculture13030552>.
17. Perazzolli, M.; Campisano, S.; Pertot, I. Organic vs. Conventional: Impact of Cultivation Treatments on the Soil Microbiota in Vineyards. *Frontiers in Microbiology* **2023**, (14), 1242267. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1242267>.
18. Rebouh, N.Y.; Latati, M.; Polityko, P.; Kucher, D.; Hezla, L.; Norezine, A.; Kalisa, L.; Utkina, A.; Vvedenskiy, V.; Gadzhikurbanov, A.; Ivanov, N. Influence of Three Cultivation Technologies to Control *Fusarium* spp. in Winter Wheat (*Triticum aestivum* L.) Production under Moscow Conditions. *Research on Crops* **2020**, (1), 17–25. <https://doi.org/10.31830/2348-7542.2020.003>.
19. Ruiz, M.A.; Portillo, M.C. Grapevine Rootstock and Soil Microbiome Interactions: Keys for a More Sustainable Viticulture. *Horticulturae* **2022**, (8), 254. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8040254>.
20. Yeoh, Y.K.; Dennis, P.G.; Hugenholtz, P. Wine Terroir and the Soil Bacteria: An Amplicon Sequencing-Based Assessment. *Frontiers in Microbiology* **2020**, (11), 597944. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.597944>.

УДК 58.051

DOI: 10.19047/0136-1694-2026-129-111-135



Ссылки для цитирования:

Макаров В.П., Юргенсон Г.А. Иттрий в почвах и растениях Восточного Забайкалья // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2026. Вып. 129. С. 111-135. DOI: 10.19047/0136-1694-2026-129-111-135

Cite this article as:

Makarov V.P., Yurgenson G.A., Yttrium in soils and plants of Eastern Transbaikalia, Dokuchaev Soil Bulletin, 2026, V. 129, pp. 111-135, DOI: 10.19047/0136-1694-2026-129-111-135

Благодарность.

Работа выполнена при поддержке Института природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН.

Вклад авторов. Вклад авторов в концептуализацию, верификацию данных, формальный анализ, проведение исследований, написание и редактирование рукописи, визуализацию равнозначный.

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

Заявление об использовании технологий искусственного интеллекта.

При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовались.

Заявление о доступности данных.

Все данные, полученные в ходе этого исследования, включены в опубликованную статью.

Acknowledgments.

The work was carried out with the support of the Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

Authors' contributions. The authors made equal contributions to conceptualization, data verification, formal analysis, conducting research, writing and editing the manuscript, and visualization.

Conflicts of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Statement on the use of artificial intelligence technologies.

Generative artificial intelligence technologies were not used in the creation of this article.

Data availability.

All the data obtained during this study are included in the published article.

Иттрий в почвах и растениях Восточного Забайкалья

© 2026 г. В. П. Макаров*, Г. А. Юргенсон**

*Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, Россия,
672014, г. Чита, Недорезова, 16а,*

**<https://orcid.org/0000-0001-8882-9339>, e-mail: vm2853@mail.ru,*

***<https://orcid.org/0000-0002-7818-7528>, e-mail: yurgga@mail.ru.*

*Поступила в редакцию 28.08.2025, после доработки 23.10.2025,
принята к публикации 21.08.2026*

Резюме: Исследовано содержание иттрия в природных и техногенных почвах в районах золоторудных и полиметаллического месторождений Восточного Забайкалья. Цель исследований – выяснить содержание иттрия в почвах и установить его связь с концентрацией в растениях. Среднее валовое содержание элемента в природных и техногенных почвах существенно не различалось и находилось в пределах соответственно 11.2–18.0 и 10.1–19.4 мг/кг. Доля подвижных форм иттрия составляла от 34 до 63% в природных и 43–53% в техногенных почвах. Выделен район, в почвах которого содержание иттрия существенно выше, чем в других месторождениях. Исследована концентрация иттрия в 33 видах дикорастущих растений, произрастающих в природных и техногенных местообитаниях. Показано, что виды растений значительно различаются по поглощению элемента. Разница в концентрации элемента между видами растений достигала 400 раз. Отмечено большее накопление иттрия в подземной части растений. Статистически достоверная положительная связь, на 5%-ном уровне значимости, валового содержания иттрия в почве с концентрацией элемента в надземной части растений получена на Дарасунском месторождении ($r = 0.72$). Коэффициент биогеохимической подвижности (B_x) иттрия характеризовался слабой доступностью и относительно низкой степенью использования его подвижных форм исследованными растениями. В большей мере иттрий поглощался подземной частью растений, например, *Chamaenerion angustifolium*, *Scutellaria baicalensis* и *Trifolium repens* ($B_x = 0.29–0.45$).

Ключевые слова: рудные месторождения; природные и техногенные ландшафты; накопление элемента; окружающая среда.

Yttrium in soils and plants of Eastern Transbaikalia

© 2026 V. P. Makarov*, G. A. Yurgenson**

¹*Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology of the Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences,*

16a Nedorezova, Chita 672014, Russian Federation,

**<https://orcid.org/0000-0001-8882-9339>, e-mail: vm2853@mail.ru,*

***<https://orcid.org/0000-0002-7818-7528>, e-mail: yurgga@mail.ru.*

Received 28.08.2025, Revised 23.10.2025, Accepted 21.08.2026

Abstract: The content of yttrium in natural and technogenic soils in the areas of gold and polymetallic deposits in Eastern Transbaikalia was studied. The purpose of the research was to determine the content of yttrium in soils and to establish its relationship with its concentration in plants. The average gross content of the element in natural and technogenic soils did not differ significantly and ranged from 11.2 to 18.0 mg/kg and from 10.1 to 19.4 mg/kg, respectively. The share of mobile yttrium forms ranged from 34 to 63% in natural soils and from 43 to 53% in technogenic soils. A gold deposit area has been identified, where the content of yttrium in the soil is significantly higher than in other deposits. The concentration of yttrium in 33 species of wild plants growing in natural and anthropogenic habitats has been studied. It has been shown that plant species differ significantly in their absorption of the element. The difference in element concentration between plant species can be as high as 400 times. A greater accumulation of yttrium in the underground parts of plants has been observed. A statistically significant positive correlation, at the 5% significance level, between the gross content of yttrium in the soil and the concentration of the element in the above-ground part of plants was obtained at the Darasun deposits ($r = 0.72$). The coefficient of biogeochemical mobility (Bm) of yttrium was characterized by low availability and a relatively low degree of use of its mobile forms by the plants studied. Yttrium was absorbed by the underground part of plants, such as *Chamaenerion angustifolium*, *Scutellaria baicalensis*, and *Trifolium repens* ($Bx = 0.29-0.45$).

Keywords: ore deposits; natural and technogenic landscapes; accumulation of elements; environment.

ВВЕДЕНИЕ

Иттрий вместе со скандием и лантаноидами входит в состав группы редкоземельных элементов (РЗЭ). Элемент применяется

во многих отраслях экономики: в металлургии, электронной промышленности и других областях. Редкоземельные элементы являются легкогидролизуемыми элементами, концентрации их ионов в водных растворах очень чувствительны к изменению физических и химических условий окружающей среды (Петренко и др., 2022). Способность растений поглощать РЗЭ из почвы определяется концентрациями почвенных хелатов и внесением минеральных удобрений, а также видовыми особенностями растений. В сухостепной зоне при нейтральной реакции среды лантаниды теряют подвижность и становятся недоступными растениям. Наиболее активно их растворение идет в почвах (полу)гумидных регионов (Водяницкий, 2012).

Среднее содержание (кларк) иттрия в верхней части земной коры равно 21 мг/кг (Rudnick, Gao, 2003). Ультраосновные породы содержат иттрия 0.5–5.0 мг/кг, кислые породы и песчаники – 28–50 мг/кг (Kabata-Pendias, 2011).

В Восточном Забайкалье в основных типах пород Шерловгорского олово-полиметаллического месторождения обнаружено иттрия в пределах 6.8–112.0 мг/кг (Еремин, Абрамов, 2016). В рудах других полиметаллических месторождений Восточного Забайкалья выявлено содержание 0.6–10.14 мг/кг элемента (Цыренов, 2021). В рудах хвостохранилища золото-молибденового месторождения Давенда находилось 5–21 мг/кг иттрия (Юргенсон и др., 2016).

В составе альбитизированных гранитов Западного Забайкалья обнаружено от 12.0 до 560 мг/кг иттрия (Рампилов и др., 2013). В коренных породах Прибайкалья отмечено среднее содержание 22.5 мг/кг. Ореолы с максимальным содержанием иттрия (до 100 мг/кг и более) приурочены преимущественно к северо-западному побережью оз. Байкал, а также к левобережью р. Ангарты, от оз. Байкал до г. Зимы (Китаев, Гребенщикова, 2011).

Среднее содержание иттрия в почвах мира составляет 25 мг/кг. Средняя концентрация иттрия в неокультуренных почвах равна 23 мг/кг, а в окультуренных – 15 мг/кг (Kabata-Pendias, 2011).

В природных почвах Восточного Забайкалья обнаружено иттрия от 16.5 до 42 мг/кг (Гуляева и др., 2021).

В техногенных почвах полиметаллических месторождений Восточного Забайкалья содержалось от 1.0 до 17.0 мг/кг иттрия (Юргенсон и др., 2016.; Цыренов, 2021).

В почвах России содержание иттрия находилось в пределах от 1.24 до 41.6 мг/кг (Афанасьева и др., 2021; Китаев, Гребенщикова, 2011; Жарикова, 2018; Скуридин и др., 2016; Семендяева и др., 2021; Дьякова, Сливкин, 2022; Антонова, Ладонин, 2022).

В незагрязненных почвах лесных массивов Польши концентрация иттрия находилась в пределах 2.25–27.93 мг/кг (Jeske, Gworek, 2013), в почвах Китая – 22 мг/кг, Швеции – 4.9–17.6 мг/кг (Tyler, 2004).

В результате деятельности человека содержание иттрия в почве может увеличиться до 1000 мг/кг. В частности, среднее содержание РЗЭ в почвах Китая составляет 177 мг/кг, а в сельскохозяйственных почвах достигает 243 мг/кг.

Благодаря высокой подвижности эти металлы легко распространяются из хвостохранилищ, где производится добыча редкоземельных элементов, с воздушными и водными потоками. В результате общая концентрация редкоземельных элементов в соседних почвах достигает 870–1100 мг/кг (Kotelnikova et al., 2021).

В съедобных растениях концентрации иттрия колеблются от 20 до 100 мг/кг золы. Содержание иттрия в пищевых растениях из зоны тропических лесов составляют 0.01–3.5 мг/кг сухой массы. Голосеменные растения способны накапливать элемент до 700 мг/кг золы, лишайники – в пределах 0.2–2.0 мг/кг, а мхи – до 1.3–7.5 мг/кг. Для мхов и лишайников в литературе приводится содержание иттрия от 2 до 200 мг/кг на сухую массу (Kabata-Pendias, 2011).

В районах золоторудных месторождений Восточного Забайкалья в листьях березы повислой обнаружено 0.10 мг/кг, в листьях ивы Миябе – 0.03 мг/кг иттрия (Макаров и др., 2024; Макаров, 2024).

В растениях Бурятии выявлено от 0.085 до 2.55 мг/кг иттрия (Афанасьева и др., 2021; Мирович и др., 2012; Афанасьева и др., 2024).

В других растениях и районах России обнаружено от 0.00002 до 3.81 мг/кг иттрия (Мирович, Петухова, 2017; Егорова,

Кислицина, 2010; Скуридин и др., 2016; Дьякова, 2023; Фурса и др., 2017; Бубенчикова, Сухомлинов, 2005; Круглов, Прокушева, 2022; Агбалян и др., 2022; Танцерева и др., 2006).

В лесных растениях Германии выявлено 0.18–0.25 мг/кг, мхах Швеции – 0.120–0.134 мг/кг иттрия (Tyler, 2004).

Иттрий является потенциально фитотоксичным элементом. Выращивание растений при температуре 27 °C вызвало значительное нарушение метаболизма ряда углеводов и аминокислот, связанных с метаболизмом галактозы, фенилаланина и глутамата. Нарушение метаболизма нуклеотидов является причиной усиления фитотоксичности иттрия при экстремально высокой температуре (Gong et al., 2022).

Предположительно, лантаноиды могут оказывать хроническое токсическое воздействие на человека и вызывать долгосрочные негативные последствия. В частности, длительное воздействие высоких доз редкоземельных элементов коррелирует со снижением коэффициента интеллекта у детей, нарушениями кровообращения и иммунной системы, снижением скорости нервной проводимости и увеличением распространенности атеросклероза. Наиболее важным свойством редкоземельных элементов, определяющим их воздействие на биоту, является их ионный радиус, близкий к радиусу кальция. Это позволяет ионам редкоземельных элементов вступать в конкурентную реакцию и фактически замещать кальций во многих биохимических процессах, происходящих в живых организмах, что, в свою очередь, приводит к ингибированию ферментов, дестабилизации клеточной мембраны и т. д. (Kotelnikova et al., 2021).

На накопление РЗЭ в растениях влияют многочисленные биотические факторы, такие как вид и генотип растений, а также абиотические факторы, такие как концентрация РЗЭ в почве и некоторые химические и физические характеристики почвы. Существуют виды растений, называемые гипераккумуляторами, которые способны накапливать значительные количества редкоземельных элементов без каких-либо негативных последствий (Kastori et al., 2023). В штате Айдахо (США) предложен способ по фитодобыче редкоземельных элементов с помощью двукисточника тростниковидного – *Phalaris arundinacea* (L.) Rauschert, спо-

собного накапливать в своей массе РЗЭ до 27 940 мкг/г (Richardson et al., 2025).

В связи с дальнейшим развитием горнодобывающей промышленности в Забайкалье важно иметь представление о содержании РЗЭ, в частности иттрия, в почве и растениях местной флоры. Это позволит правильно организовать мониторинг и защиту окружающей среды от загрязнения токсичными для растений, животных и человека элементами.

Цель исследования – определить содержание иттрия в почвах и установить его связь с концентрацией в растениях.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследования были проведены в районах золоторудных месторождений, а также Быстринского полиметаллического месторождения в Восточном Забайкалье (рис. 1).



Рис. 1. Районы исследований, месторождения: I – Любавинское, II – Дарасунское, III – Среднеголготайское, IV – Казаковско-Ключевское, V – Быстринское.

Fig. 1. Research areas and deposits: I – Lyubavinskoe, II – Darasunskoe, III – Srednegolgotaiskoe, IV – Kazakovsko-Klyuchevskoe, V – Bystrinskoe.

Авторы определяли содержание иттрия в наземной части 33 видов растений. Отбирали от 3 до 6 экземпляров вида растений на пробной площади в зависимости от их массы согласно нормативным требованиям (ОФС.1.1.0005.15).

У отдельных видов растений отбирали также подземные органы. Надземные и подземные части растений после подсушки до воздушно-сухого состояния измельчали до порошкообразного состояния. Подземные органы после извлечения из почвы освобождали от почвы и промывали водой. Объединенная проба почвы отбиралась вблизи корневой системы растений, в слое 0–40 см (ГОСТ 17.4.3.01-2017).

Анализ почвенных и растительных образцов проводился в лаборатории физико-химических методов исследования Института тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина (г. Хабаровск). Для анализа почвенных и растительных проб использовался масс-спектрофотометр ICP-MS Elan 9000 (Канада) и метод спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ПНД Ф 16.1:2.3:3.11-98). Для анализа подвижных форм элементов применяли кислотный способ определения по пункту 5.1.2.2 – Кислотная экстракция металлов из почв азотной кислотой молярной концентрации 5.0 моль/дм³. Соотношение почва : кислота составляло 1 : 5. “Холодную пробу” готовили параллельно с партией анализируемых проб, и она содержала те же реактивы и в тех же количествах, что и анализируемые пробы.

Коэффициент биогеохимической подвижности определяли по формуле Н.С. Касимова:

$$B_x = l/m,$$

где l – концентрация элемента в сухом веществе растений, m – содержание подвижных форм элемента, извлекаемых из почвы слабыми растворителями (Дьяконов и др., 1996).

Статистическая обработка данных проводилась с помощью программы Microsoft Excel 2010, в разделе “Описательная статистика”.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Содержание иттрия в почве. Среднее валовое содержание иттрия в природных и техногенных почвах существенно не различалось. В природных почвах среднее содержание находилось в пределах 11.2–18.0 мг/кг, а в техногенных – от 10.1 до 19.4 мг/кг. Содержание подвижных форм иттрия в природных и техногенных почвах также не имело существенных различий. Их доля составляла от 34 до 63% в природных почвах и 43–53% в техногенных почвах (табл. 1).

Достоверно большее валовое содержание иттрия отмечено в почвах Казаковско-Ключевского месторождения (рис. 2).

Концентрация иттрия в растениях. Виды исследованных растений значительно различались по концентрации иттрия в надземной части. Максимальная концентрация элемента выявлена в клевере ползучем (1.58 мг/кг), а минимальная (0.004 мг/кг) – в вахте трехлистной. Среди деревьев относительно высокая концентрация элемента была установлена у сосны обыкновенной и тополя душистого (табл. 2).

Из кустарников, полукустарников и кустарничков выделялись по концентрации иттрия в наземной части чабрец даурский (0.32 мг/кг) и полынь Гмелина (0.16 мг/кг). В травах, помимо клевера ползучего, относительно высокая концентрация иттрия обнаружена в наземной части валерианы очереднолистной (0.47 мг/кг), термопсиса ланцетного (0.24 мг/кг). Многие растения характеризовались значительной вариацией содержания иттрия в наземной части (рис. 3).

Средняя концентрация иттрия в подземной части всех исследованных растений была значительно больше (в 2–40 раз), чем в надземной части. Минимальная концентрация иттрия отмечена в корне молочая Фишера (0.17 мг/кг), а максимальная – в подземной части клевера ползучего (3.10 мг/кг) (рис. 4).

Статистически достоверная положительная связь (на 5%-ном уровне значимости) валового содержания иттрия в почве с концентрацией элемента в надземной части растений получена на Дарасунском месторождении ($r = 0.72$).

Таблица 1. Среднее содержание иттрия в почве месторождений Восточного Забайкалья, мг/кг

Table 1. Average content of yttrium in the soil of the Eastern Transbaikalia deposits, mg/kg

Статистические параметры	Почва			
	природная		техногенная	
	Валовое	Подвижные формы	Валовое	Подвижные формы
Любавинское месторождение золота				
n	3	3	4	4
$\bar{X}$	11.6	6.6	10.1	5.4
m_x	1.8	0.5	1.0	0.5
Min–max.	8.1–13.8	5.7–7.3	8.4–12.9	4.7–6.8
Cv, %	26	12	20	17
Среднеолготайское месторождение золота				
n	10	10	1	1
$\bar{X}$	12.9	8.1	13.3	6.1
m_x	0.6	0.64	–	–
Min–max.	10.0–15.6	3.9–10.2	–	–
Cv, %	15	25	–	–
Казаковско-Ключевское месторождение золота				
n	3	3	4	4
$\bar{X}$	18.0	6.1	19.4	8.4
m_x	0.3	0.9	2.8	1.8
Min–max.	17.6–18.6	4.5–7.7	13.9–25.4	4.4–12.1
Cv, %	3	26	29	44
Дарасунское месторождение золота				
n	4	–	8	–
$\bar{X}$	11.2	–	14.8	–
m_x	2.6	–	1.8	–
Min–max.	3.7–15.0	–	6.2–24.8	–
Cv, %	47	–	34	–
Быстринское полиметаллическое месторождение				
n	18	–	–	–
$\bar{X}$	13.1	–	–	–
m_x	1.7	–	–	–
Min–max.	1.9–27.2	–	–	–
Cv, %	54	–	–	–

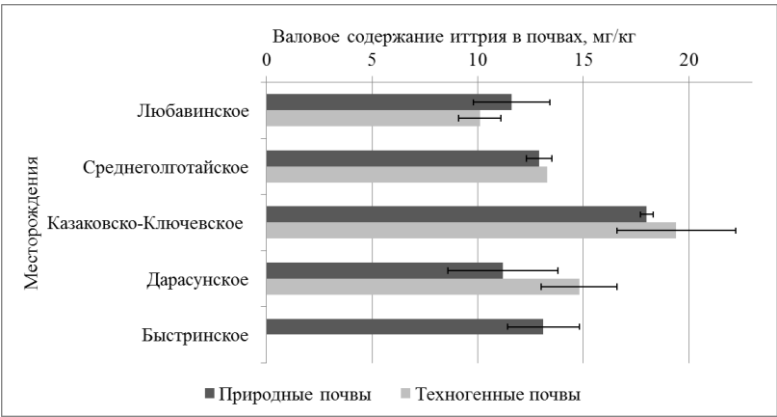


Рис. 2. Сравнительное содержание иттрия в почвах месторождений.
Fig. 2. Comparative content of yttrium in deposit soils.

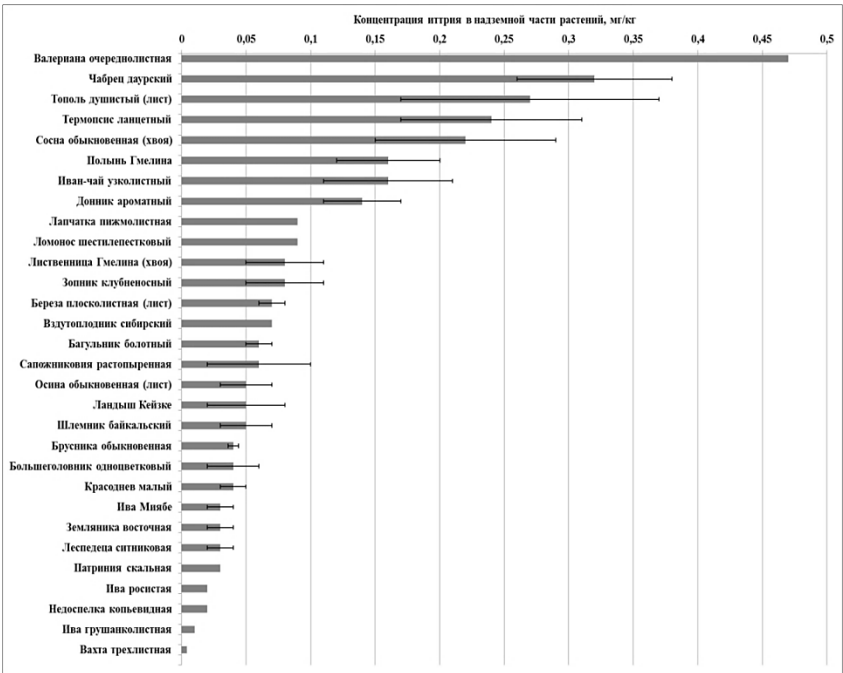


Рис. 3. Концентрация иттрия в наземной части видов растений, мг/кг.
Fig. 3. Concentration of yttrium in the aerial parts of plant species, mg/kg.

Таблица 2. Средняя концентрация иттрия в растениях, мг/кг

Table 2. Average concentration of yttrium in plants, mg/kg

Растение	Надземная часть				Подземная часть			
	n	$\bar{X}$	m_x	Min–max.	n	$\bar{X}$	m_x	Min–max.
Деревья								
Береза плосколистная (лист) <i>Betula pendula</i> Roth	27	0.07	0.01	0.02–0.33	–	–	–	–
Лиственница Гмелина (хвоя) <i>Larix gmelinii</i> (Rupr.) Rupr.	15	0.08	0.03	0.02–0.24	–	–	–	–
Осина обыкновенная (лист) <i>Populus tremula</i> L.	3	0.05	0.02	0.03–0.06	–	–	–	–
Сосна обыкновенная (хвоя) <i>Pinus sylvestris</i> L.	4	0.22	0.07	0.11–0.43	–	–	–	–
Тополь душистый (лист) <i>Populus suaveolens</i> Fisch.	15	0.27	0.10	0.03–1.54	–	–	–	–
Кустарники								
Багульник болотный <i>Ledum palustre</i> L.	13	0.06	0.01	0.02–0.19	–	–	–	–
Ива грушанколистная <i>Salix pyrolifolia</i> Ledeb.	1	0.01	–	–	–	–	–	–
Ива Миябе <i>Salix miyabeana</i> Seemen	10	0.03	0.01	0.01–0.08	–	–	–	–
Ива росистая <i>Salix rorida</i> Laksch.	1	0.02	–	–	–	–	–	–

Продолжение таблицы 2

Table 2 continued

Растение	Надземная часть				Подземная часть			
	n	$\bar{X}$	m_x	Min–max.	n	$\bar{X}$	m_x	Min–max.
Полукустарники								
Полынь Гмелина <i>Artemisia gmelinii</i> Weber ex Stechm.	7	0.16	0.04	0.07–0.31	3	1.03	0.25	0.55–1.37
Кустарнички								
Брусника обыкновенная <i>Vaccinium vitis-idaea</i> L.	16	0.04	0.004	0.02–0.08	–	–	–	–
Чабрец даурский <i>Thymus dahuricus</i> Serg.	6	0.32	0.06	0.13–0.51	–	–	–	–
Травы								
Большоголовник одноцветковый <i>Stemmacantha uniflora</i> (L.) Dittrich	3	0.04	0.02	0.02–0.07	2	1.56	0.06	1.5–1.61
Валериана очереднолистная <i>Valeriana alternifolia</i> Ledeb.	1	0.47	–	–	–	–	–	–
Вахта трехлистная <i>Menyanthes trifoliata</i> L.	1	0.004	–	–	–	–	–	–
Вздутоплодник сибирский <i>Phlojodicarpus sibiricus</i> (Stephan ex Spreng.) Koso-Pol.	1	0.07	–	–	3	1.27	0.60	0.21–2.28
Донник ароматный <i>Melilotus suaveolens</i> Ledeb.	2	0.14	0.03	0.11–0.17	1	1.91	–	–

Продолжение таблицы 2

Table 2 continued

Растение	Надземная часть				Подземная часть			
	n	$\bar{X}$	m_x	Min–max.	n	$\bar{X}$	m_x	Min–max.
Земляника восточная <i>Fragaria orientalis</i> Losinsk.	2	0.03	0.01	0.02–0.04	–	–	–	–
Зопник клубненосный <i>Phlomoide tuberosa</i> (L.) Moench	15	0.08	0.03	0.01–0.4	–	–	–	–
Иван-чай узколистый <i>Chamaenerion angustifolium</i> (L.) Scop.	4	0.16	0.05	0.03–0.27	1	1.95	–	–
Недоспелка копьевидная <i>Parasenecio hastatus</i> (L.) H. Koyama	1	0.02	–	–	2	1.35	0.6	0.75–1.95
Клевер ползучий <i>Trifolium repens</i> L	2	1.58	0.82	0.76–2.4	1	3.10	–	–
Красоднев малый <i>Hemerocallis minor</i> Mill.	5	0.04	0.01	0.01–0.06	1	1.57	–	–
Ландыш Кейске <i>Convallaria keiskei</i> Miq.	2	0.05	0.03	0.02–0.08	–	–	–	–
Лапчатка пижмолистная <i>Potentilla tanacetifolia</i> Willd. ex D.F.K. Schltld.	1	0.09	–	–	–	–	–	–
Леспедца ситниковая <i>Lespedeza juncea</i> (L. f.) Pers.	2	0.03	0.01	0.02–0.04	–	–	–	–
Ломонос шестилепестковый <i>Clematis exapetala</i> Pall.	1	0.09	–	–	–	–	–	–

Продолжение таблицы 2

Table 2 continued

Растение	Надземная часть				Подземная часть			
	n	$\bar{X}$	m_x	Min–max.	n	$\bar{X}$	m_x	Min–max.
Молочай Фишера <i>Euphorbia fischeriana</i> Steud.	–	–	–	–	3	0.17	0.03	0.13–0.23
Патриния скальная <i>Patrinia rupestris</i> (Pall.) Dufr.	1	0.03	–	–	–	–	–	–
Пион молочноцветковый <i>Paeonia lactiflora</i> Pall.	–	–	–	–	2	0.93	0.09	0.84–1.02
Сапожниковия растопыренная <i>Saposhnikovia divaricata</i> (Turcz.) Schischk.	2	0.06	0.04	0.02–0.1	7	0.72	0.14	0.12–1.15
Термопсис ланцетный <i>Thermopsis lanceolata</i> R. Br.	9	0.24	0.07	0.01–0.62	5	0.37	0.11	0.06–0.74
Шлемник байкальский <i>Scutellaria baicalensis</i> Georgi	2	0.05	0.02	0.03–0.06	1	1.75	–	–



Рис. 4. Концентрация иттрия в подземной части растений, мг/кг.

Fig. 4. Concentration of yttrium in the underground part of plants, mg/kg.

Коэффициент биогеохимической подвижности (B_x) характеризует доступность элементов растениям и степень использования ими подвижных форм элементов, содержащихся в почве.

Иттрий в наших исследованиях характеризуется слабой доступностью и относительно низкой степенью использования его подвижных форм обследованными растениями. В большей мере элемент используется подземной частью растений, например, иван-чая узколистного, шлемника байкальского и клевера ползучего ($B_x = 0.29-0.45$) (табл. 3).

Таблица 3. Коэффициент биогеохимической подвижности иттрия (B_x) в растениях

Table 3. The coefficient of biogeochemical mobility of yttrium (B_x) in plants

Растение	Надземная часть		Подземная часть	
	$\bar{X}$	Min–max.	$\bar{X}$	Min–max.
Патриния скальная <i>Patrinia rupestris</i> (Pall.) Dufr.	0.23			
Клевер ползучий <i>Trifolium repens</i> L.	0.13	0.07–0.20	0.29	
Валериана очереднолистная <i>Valeriana alternifolia</i> Ledeb.	0.05			
Термопсис ланцетный <i>Thermopsis lanceolata</i> R. Br.	0.04	0.002–0.06	0.05	0.01–0.09
Иван-чай узколистный <i>Chamaenerion angustifolium</i> (L.) Scop.	0.03		0.45	
Чабрец даурский <i>Thymus dahuricus</i> Serg.	0.03	0.02–0.04		
Полынь Гмелина <i>Artemisia gmelinii</i> Weber ex Stechm.	0.02	0.02–0.03	0.16	0.09–0.23
Донник ароматный <i>Melilotus suaveolens</i> Ledeb.	0.02	0.01–0.02	0.16	
Зопник клубненосный <i>Phlomoideis tuberosa</i> (L.) Moench	0.01	0.005–0.028		
Вздутоплодник сибирский <i>Phlojodicarpus sibiricus</i> (Stephan ex Spreng.) Koso-Pol.	0.01		0.03	
Лапчатка пижмолистная <i>Potentilla tanacetifolia</i> Willd. ex D.F.K. Schltld.	0.009			
Сапожниковия растопыренная <i>Saposhnikovia divaricata</i> (Turcz.) Schischk.	0.009	0.003–0.016	0.12	0.06–0.18
Ломонос шестилепестковый <i>Clematis exapetala</i> Pall.	0.009			

Продолжение таблицы 3
Table 3 continued

Растение	Надземная часть		Подземная часть	
	$\bar{X}$	Min–max.	$\bar{X}$	Min–max.
Шлемник байкальский <i>Scutellaria baicalensis</i> Georgi	0.007	0.004–0.010	0.29	
Ландыш Кейске <i>Convallaria keiskei</i> Miq.	0.006	0.002–0.010		
Красоднев малый <i>Hemerocallis minor</i> Mill.	0.006	0.003–0.011	0.16	
Береза плосколистная (лист) <i>Betula pendula</i> Roth	0.006	0.003–0.005		
Большоголовник одноцветковый <i>Stemmacantha uniflora</i> (L.) Dittrich	0.005	0.003–0.007	0.16	0.15–0.16
Леспедеца ситниковая <i>Lespedeza juncea</i> (L. f.) Pers.	0.005	0.005–0.005		
Лиственница Гмелина (хвоя) <i>Larix gmelinii</i> (Rupr.) Rupr.	0.005	0.002–0.011		
Земляника восточная <i>Fragaria orientalis</i> Losinsk.	0.004	0.002–0.005		
Недоселка копьевидная <i>Parasenecio hastatus</i> (L.) H. Koyama	0.003		0.101	

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В районах золоторудных и полиметаллических месторождений Восточного Забайкалья установлено содержание иттрия в почве и концентрация элемента в растениях. Средняя концентрация иттрия в почве исследованных районов в два раза меньше кларка верхней части земной коры. Различия между видами растений по концентрации иттрия достигали 400 раз. На отдельных месторождениях обнаружена достоверная связь концентрации иттрия в растениях с его содержанием в почве.

Исследования подтвердили литературные данные о значительных различиях видов растений по накоплению иттрия. Это свидетельствует о перспективности исследования других видов

растений Восточного Забайкалья с целью поиска гипераккумуляторов иттрия для очистки загрязненных земель, извлечения элементов с целью экологически безопасной добычи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агбалян, Е.В.; Шинкарук, Е.В.; Печкин, А.С.; Красненко, А.С.; Письмаркина, Е.В. Элементный анализ растений естественных ландшафтов и в зоне нефтегазодобычи. *Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа* **2022**, (3), 22–43.
2. Антонова, С.А.; Ладонин, Д.В. Содержание редкоземельных элементов в почвах Центрально-Лесного государственного природного биосферного заповедника. *Почвоведение* **2022**, (2), 219–227.
3. Афанасьева, Л.В.; Аюшина, Т.А.; Рупышев, Ю.А. Особенности макро- и микроэлементного состава хвои *Larix gmelinii* в зоне разгрузки термальных вод. *Химия растительного сырья* **2024**, (3), 294–301.
4. Афанасьева, Л.В.; Аюшина, Т.А.; Рупышев, Ю.А.; Убугунов, В.Л.; Убугунова, В.И. Особенности накопления химических элементов в растениях *Potentilla anserina* L. в зоне влияния Кучигерских гидротерм. *Химия в интересах устойчивого развития* **2021**, 29 (1), 10–20.
5. Бубенчикова, В.Н.; Сухомлинов, Ю.А. Лабазник шестилепестковый: аминокислотный и минеральный состав. *Фармация* **2005**, (3), 9–11.
6. Водяницкий, Ю.Н. Лантаниды почвы и их влияние на растения. *Агрохимия* **2012**, (4), 84–96.
7. ГОСТ 17.4.3.01-2017. Охрана природы (ССОП). Почвы. Общие требования к отбору проб. https://marsbbz.ru/wp-content/uploads/2021/05/gost-17.4.3.01-2017-ohrana-prirody-ssop.-pochvy.-obshhie-trebovaniya-k-otboru-prob-s-popravkoj_tekst.pdf.
8. Гуляева, У.А.; Ермаков, В.В.; Кузьмина, Т.Г.; Ромашова, Т.В. Особенности химического элементного состава почв и волосяного покрова животных в районе распространения урвской Кашина–Бека болезни. *Биохимические инновации в условиях коррекции техногенеза биосферы*; Труды Международного биогеохимического Симпозиума, 2020; pp 275–284.
9. Дьякова, Н.А. Исследование элементного состава лекарственного растительного сырья Воронежской области. *Разработка и регистрация лекарственных средств* **2023**, 12 (3), 195–201.
10. Дьякова, Н.А.; Сливкин, А.И. Особенности накопления макро- и микроэлементов в цветках пижмы обыкновенной флоры Воронежской области. *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Химия. Биология. Фармация* **2022**, (3), 69–74.

11. Дьяконов, К.Н.; Касимов, Н.С.; Тикунов, В.С. *Современные методы географических исследований*; Просвещение: М., 1996.
12. Егорова, И.А.; Кислицина, Ю.В. Микроэлементы (Yb, Y, V, Zr, Nb) в растениях Северо-Западного Алтая. *Мир науки, культуры, образования* **2010**, (4–2), 267–269.
13. Еремин, О.В.; Абрамов, Б.Н. Распределение лантаноидов и иттрия в породах и карьерных водах Шерловогорского олово-полиметаллического месторождения (Восточное Забайкалье). *Вода: химия и экология* **2016**, (1), 18–23.
14. Жарикова, Е.А. Слабоизученные потенциально опасные химические элементы в почвах урбанизированных территорий юга Приморья. *Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук* **2018**, (4), 105–112.
15. Китаев, Н.А.; Гребенщикова, В.И. Рудные и редкие химические элементы в окружающей среде Прибайкалья (коренные породы, почвы, донные отложения). *Вестник Иркутского государственного технического университета* **2011**, (8), 40–46.
16. Круглов, Д.С.; Прокушева, Д.Л. Микроэлементный состав наиболее распространенных растений рода *Artemisia* L. *Химия растительного сырья* **2022**, (3), 139–149.
17. Макаров, В.П. Содержание химических элементов в листьях ивы Миябе (*Salix miyabeana* Seemen), произрастающей в районе хвостохранилища Дарасунского месторождения золота. *Агрохимия* **2024**, (10), 83–93.
18. Макаров, В.П.; Филенко, Р.А.; Михеев, И.Е.; Желибо, Т.В.; Банщикова, Е.А. Элементный состав листьев березы повислой (*Betula pendula* Roth) в районе золоторудного месторождения Забайкалья. *Агрохимия* **2024**, (4), 95–104.
19. Минович, В.М.; Петухова, С.А. Изучение элементного состава наземных органов володушки козелецелистной (*Bupleurum scorzonerifolium* Willd), произрастающей в Прибайкалье. *Вестник ВСГУТУ* **2017**, (1), 39–43.
20. Минович, В.М.; Федосеева, Г.М.; Кривошеев, И.М. Изучение элементного состава наземных органов спиреи иволистной (*Spiraea salicifolia* L.). *Вестник Бурятского государственного университета* **2012**, (S3), 109–112.
21. ОФС.1.1.0005.15. Отбор проб лекарственного растительного сырья и лекарственных растительных препаратов. <https://pharmacopoeia.ru/ofs-1-1-0005-15-otbor-prob-lekarstvennogo-rastitelnogo-syrya-i-lekarstvennyh-rastitelyh-preparatov>.
22. Петренко, Д.Б.; Ерофеева, К.Г.; Окина, О.И. Редкоземельные элементы в окружающей среде: концентрации, особенности геохимической ми-

- грации и методы определения (обзор). *Теоретическая и прикладная экология* **2022**, (1), 6–16.
23. ПНД Ф 16.1:2.3:3.11-98. Количественный химический анализ почв; М., 2005. <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/19e/4293777593.pdf>.
24. Рампилов, М.О.; Рипп, Г.С.; Дорошкевич, А.Г.; Канакин, С.В.; Ходырева, Е.В. Редкометалльная минерализация в альбитизированных гранитах участка Ирбо (Западное Забайкалье). *Записки Российского минералогического общества* **2013**, 142 (2), 67–83.
25. Семендяева, Н.В.; Морозова, А.А.; Добротворская, Н.И.; Елизаров, Н.В. Редкоземельные элементы в почвах засоленных агроландшафтов Барабинской равнины. *Сибирский вестник сельскохозяйственной науки* **2021**, 51 (3), 5–14.
26. Скуридин, Г.М.; Чанкина, О.В.; Легкодымов, А.А.; Багинская, Н.В.; Куценогий, К.П. Поглощение химических элементов корнями сибирской облепихи (*Hippophae rhamnoides* L. ssp. *mongolica* Rousi). *Химия в интересах устойчивого развития* **2016**, 24 (5), 653–660.
27. Танцерева, И.Г.; Попов, А.И.; Чистохин, Ю.Г.; Большаков, В.В. Эколого-фармакогностическое исследование некоторых лекарственных растений Кемеровской области. *Медицина в Кузбассе* **2006**, 5 (2), 23–27.
28. Фурса, Н.С.; Круглов, Д.С.; Белокуров, М.М. Элементарный состав растений рода *Vaccinium*. *Фармация* **2017**, 66 (1), 33–36.
29. Цыренов, Т.Г. Особенности распределения редкоземельных элементов в природно-техногенных комплексах некоторых полиметаллических месторождений Восточного Забайкалья. *Вестник Забайкальского государственного университета* **2021**, 27 (1), 15–23.
30. Юргенсон, Г.А.; Смирнова, О.К.; Солодухина, М.А.; Филенко, Р.А. Геохимические особенности руд и техноземов хвостохранилища золото-молибденового рудника Давенда в Восточном Забайкалье. *Литосфера* **2016**, (2), 91–106.
31. Gong, B.; Qiu, H.; Van Gestel, C.A.; Peijnenburg, W.J.; He, E. Increasing Temperatures Potentiate the Damage of Rare Earth Element Yttrium to the Crop Plant *Triticum aestivum* L. *J. Agric. Food Chem.* **2022**, 70 (51), 16390–16400.
32. Jeske, A.; Gworek, B. Distribution and Mobility of Scandium and Yttrium in Selected Types of Soils in Poland. *Chem. Speciation Bioavailability* **2013**, 25 (3), 216–222.
33. Kabata-Pendias, A. *Trace Elements in Soils and Plants*, 4th ed.; CRC Press: Boca Raton, 2011.
34. Kastori, R.R.; Maksimović, I.V.; Putnik-Delić, M.I. Rare Earth Elements in Environment and Effects on Plants: A Review Scientific Paper. *Zb. Matice Srp. Prir. Nauke* **2023**, (144), 51–72.

35. Kotelnikova, A.D.; Rogova, O.B.; Stolbova, V.V. Lanthanides in the Soil: Routes of Entry, Content, Effect on Plants, and Genotoxicity (a Review). *Eurasian Soil Sci.* **2021**, 54 (1), 117–134.
36. Richardson, K.; Mirkouei, A.; Duellman, K.; Aylward, A.; Zirker, D.; Schwarz, E.; Sun, Y. Extraction of Rare Earth Elements from Idaho-Sourced Soil Through Phytomining: A Case Study in Central Idaho, USA. *Sustainability* **2025**, 17 (11), 5118.
37. Rudnick, R.L.; Gao, S. Composition of the Continental Crust. In *Treatise on Geochemistry*; Elsevier Science, 2003; Vol. 3, pp 1–64.
38. Tyler, G. Rare Earth Elements in Soil and Plant Systems – A Review. *Plant Soil* **2004**, 267 (1), 191–206.

REFERENCES

1. Agbalyan, E.V.; Shinkaruk, E.V.; Pechkin, A.S.; Krasnenko, A.S.; Pis'markina, E.V. Elemental Analysis of Plants in Natural Landscapes and in the Oil and Gas Production Zone. *Scientific Bulletin of the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug* **2022**, (3), 22–43. (In Russ.)
2. Antonova, S.A.; Ladonin, D.V. Content of Rare-Earth Elements in the Soils of the Central Forest State Nature Biosphere Reserve. *Pochvovedenie* **2022**, (2), 219–227. (In Russ.)
3. Afanas'eva, L.V.; Ayushina, T.A.; Rupyshev, Yu.A. Features of the Macro- and Microelement Composition of the Needles of *Larix gmelinii* in the Discharge Zone of Thermal Waters. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja* **2024**, (3), 294–301. (In Russ.)
4. Afanas'eva, L.V.; Ayushina, T.A.; Rupyshev, Yu.A.; Ubugunov, V.L.; Ubugunova, V.I. Features of the Accumulation of Chemical Elements in *Potentilla anserina* L. Plants in the Area Affected by the Kuchigersky Hydrothermal Fields. *Chemistry for Sustainable Development* **2021**, 29 (1), 10–20. (In Russ.)
5. Bubenchikova, V.N.; Sukhomlinov, Yu.A. *Filipendula vulgaris*: Amino Acid and Mineral Composition. *Farmatsiya* **2005**, (3), 9–11. (In Russ.)
6. Vodyanitskii, Yu.N. Soil Lanthanides and Their Effect on Plants. *Agrokhimiya* **2012**, (4), 84–96. (In Russ.)
7. GOST 17.4.3.01-2017. Nature Conservation (SSOP). Soils. General Requirements for Sampling. https://marsbbz.ru/wp-content/uploads/2021/05/gost-17.4.3.01-2017-ohrana-prirody-ssop.-pochvy.-obshhie-trebovaniya-k-otboru-prob-s-popravkoj_tekst.pdf. (In Russ.)
8. Gulyaeva, U.A.; Ermakov, V.V.; Kuz'mina, T.G.; Romashova, T.V. Features of the Chemical Elemental Composition of Soils and Animal Hair in the Area of the Kashin–Beck Disease. In *Biochemical Innovations in the Condi-*

tions of Correction of Technogenesis of the Biosphere; Proceedings of the International Biogeochemical Symposium, 2020; pp 275–284. (In Russ.)

9. D'yakova, N.A. Study of the Elemental Composition of Medicinal Plant Raw Materials in the Voronezh Region. *Drug Development & Registration* **2023**, 12 (3), 195–201. (In Russ.)

10. D'yakova, N.A.; Slivkin, A.I. Features of the Accumulation of Macro- and Microelements in the Flowers of *Tanacetum vulgare* of the Flora of the Voronezh Region. *Proceedings of Voronezh State University. Series: Chemistry. Biology. Pharmacy* **2022**, (3), 69–74. (In Russ.)

11. D'yakonov, K.N.; Kasimov, N.S.; Tikunov, V.S. *Modern Methods of Geographical Research*; Prosveshchenie: Moscow, 1996. (In Russ.)

12. Egorova, I.A.; Kislitsina, Yu.V. Microelements (Yb, Y, V, Zr, Nb) in Plants of the North-Western Altai. *The World of Science, Culture and Education* **2010**, (4–2), 267–269. (In Russ.)

13. Eremin, O.V.; Abramov, B.N. Distribution of Lanthanides and Yttrium in Rocks and Quarry Waters of the Sherlovogorsk Tin-Polymetallic Deposit (Eastern Transbaikalia). *Water: Chemistry and Ecology* **2016**, (1), 18–23. (In Russ.)

14. Zharikova, E.A. Poorly Studied Potentially Hazardous Chemical Elements in the Soils of Urbanized Areas in the South of Primorye. *Vestnik of the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences* **2018**, (4), 105–112. (In Russ.)

15. Kitaev, N.A.; Grebenshchikova, V.I. Ore and Rare Chemical Elements in the Baikal Region Environment (Bedrock, Soils, and Bottom Sediments). *Proceedings of Irkutsk State Technical University* **2011**, (8), 40–46. (In Russ.)

16. Kruglov, D.S.; Prokusheva, D.L. Microelement Composition of the Most Common Plants of the Genus *Artemisia* L. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ya* **2022**, (3), 139–149. (In Russ.)

17. Makarov, V.P. Content of Chemical Elements in the Leaves of *Salix miyabeana* Seemen, Which Grows in the Area of the Darasun Gold Mine Tailings Pond. *Agrohimia* **2024**, (10), 83–93. (In Russ.)

18. Makarov, V.P.; Filenko, R.A.; Mikheev, I.E.; Zhelibo, T.V.; Banshchikova, E.A. Elemental Composition of *Betula pendula* Roth Leaves in the Trans-Baikal Gold Deposit Area. *Agrohimia* **2024**, (4), 95–104. (In Russ.)

19. Mirovich, V.M.; Petukhova, S.A. Study of the Elemental Composition of the Aerial Parts of *Bupleurum scorzonrifolium* Willd, Which Grows in the Baikal Region. *ESSUTM Bulletin* **2017**, (1), 39–43. (In Russ.)

20. Mirovich, V.M.; Fedoseeva, G.M.; Krivosheev, I.M. Study of the Elemental Composition of the Above-Ground Organs of *Spiraea salicifolia* L. *Buryat State University Bulletin* **2012**, (S3), 109–112. (In Russ.)

21. OFS 1.1.0005.15. Sampling of Medicinal Plant Raw Materials and Medicinal Plant Preparations. <https://pharmacopoeia.ru/ofs-1-1-0005-15-otbor-prob-lekarstvennogo-rastitelnogo-syrva-i-lekarstvennyh-rastitelnyh-preparatov>. (In Russ.)
22. Petrenko, D.B.; Erofeeva, K.G.; Okina, O.I. Rare Earth Elements in the Environment: Concentrations, Geochemical Migration Features, and Determination Methods (Review). *Theoretical and Applied Ecology* **2022**, (1), 6–16. (In Russ.)
23. PND F 16.1:2.3:3.11-98. Quantitative Chemical Analysis of Soils; Moscow, 2005. <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/19e/4293777593.pdf>. (In Russ.)
24. Rampilov, M.O.; Ripp, G.S.; Doroshkevich, A.G.; Kanakin, S.V.; Khodyreva, E.V. Rare-Metal Mineralization in Albite-Bearing Granites of the Irbo Site (Western Transbaikalia). *Proceedings of the Russian Mineralogical Society* **2013**, 142 (2), 67–83. (In Russ.)
25. Semendyaeva, N.V.; Morozova, A.A.; Dobrotvorskaya, N.I.; Elizarov, N.V. Rare Earth Elements in Soils of Saline Agrolandscapes of the Baraba Plain. *Siberian Herald of Agricultural Science* **2021**, 51 (3), 5–14. <https://doi.org/10.26898/0370-8799-2021-3-1> (In Russ.)
26. Skuridin, G.M.; Chankina, O.V.; Legkodymov, A.A.; Baginskaya, N.V.; Kutsenogii, K.P. Absorption of Chemical Elements by the Roots of *Hippophae rhamnoides* L. ssp. *mongolica* Rousi. *Chemistry for Sustainable Development* **2016**, 24 (5), 653–660. (In Russ.)
27. Tantsereva, I.G.; Popov, A.I.; Chistokhin, Yu.G.; Bol'shakov, V.V. Ecological and Pharmacognostic Study of Some Medicinal Plants in the Kemerovo Region. *Medicine in Kuzbass* **2006**, 5 (2), 23–27. (In Russ.)
28. Fursa, N.S.; Kruglov, D.S.; Belokurov, M.M. Elemental Composition of *Vaccinium* Plants. *Farmatsiya* **2017**, 66 (1), 33–36. (In Russ.)
29. Tsyrenov, T.G. Features of the Distribution of Rare-Earth Elements in Natural and Technogenic Complexes of Some Polymetallic Deposits in Eastern Transbaikalia. *Transbaikalian State University Journal* **2021**, 27 (1), 15–23. (In Russ.)
30. Yurgenson, G.A.; Smirnova, O.K.; Solodukhina, M.A.; Filenko, R.A. The Geochemical Features of Ores and Technosoils of Tailing Gold-Molybdenum Mine Davenda in East Transbaikalia. *LITHOSPHERE (Russia)* **2016**, (2), 91–106. (In Russ.)
31. Gong, B.; Qiu, H.; Van Gestel, C.A.; Peijnenburg, W.J.; He, E. Increasing Temperatures Potentiate the Damage of Rare Earth Element Yttrium to the Crop Plant *Triticum aestivum* L. *J. Agric. Food Chem.* **2022**, 70 (51), 16390–16400.

32. Jeske, A.; Gworek, B. Distribution and Mobility of Scandium and Yttrium in Selected Types of Soils in Poland. *Chem. Speciation Bioavailability* **2013**, 25 (3), 216–222.
33. Kabata-Pendias, A. *Trace Elements in Soils and Plants*, 4th ed.; CRC Press: Boca Raton, 2011.
34. Kastori, R.R.; Maksimović, I.V.; Putnik-Delić, M.I. Rare Earth Elements in Environment and Effects on Plants: A Review Scientific Paper. *Zb. Matice Srp. Prir. Nauke* **2023**, (144), 51–72.
35. Kotelnikova, A.D.; Rogova, O.B.; Stolbova, V.V. Lanthanides in the Soil: Routes of Entry, Content, Effect on Plants, and Genotoxicity (a Review). *Eurasian Soil Sci.* **2021**, 54 (1), 117–134.
36. Richardson, K.; Mirkouei, A.; Duellman, K.; Aylward, A.; Zirker, D.; Schwarz, E.; Sun, Y. Extraction of Rare Earth Elements from Idaho-Sourced Soil Through Phytomining: A Case Study in Central Idaho, USA. *Sustainability* **2025**, 17 (11), 5118.
37. Rudnick, R.L.; Gao, S. Composition of the Continental Crust. In *Treatise on Geochemistry*; Elsevier Science, 2003; Vol. 3, pp 1–64.
38. Tyler, G. Rare Earth Elements in Soil and Plant Systems – A Review. *Plant Soil* **2004**, 267 (1), 191–206

УДК 631.417.1

DOI: 10.19047/0136-1694-2026-129-136-169



Ссылки для цитирования:

Вахрушев Л.А., Карманов В.Н., Борисов А.В., Недомолкина Н.Г., Дымов А.А. Химические свойства и биологическая активность почв с включенным культурным слоем в условиях средней тайги Восточно-Европейской равнины // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2026. Вып. 129. С. 136-169. DOI: 10.19047/0136-1694-2026-129-136-169

Cite this article as:

Vakhrushev L.A., Karmanov V.N., Borisov A.V., Nedomolkina N.G., Dymov A.A., Chemical properties and biological activity of soils with an incorporated cultural layer in the conditions of the middle taiga of the East European Plain, Dokuchaev Soil Bulletin, 2026, V. 129, pp. 136-169, DOI: 10.19047/0136-1694-2026-129-136-169

Благодарность.

Исследования выполнены при финансовой поддержке ГБ тем “Почвы и почвенные ресурсы Европейского Северо-Востока России в условиях современных климатических изменений, антропогенного пресса и социально-экономических вызовов” (№ 125021902454-1) и “Выявление, изучение и сохранение археологического наследия северо-востока Русской равнины” (№ ГР 126021217116-6).

Вклад авторов. Концептуализация – Вахрушев Л.А., Карманов В.Н., Дымов А.А.; методология – Карманов В.Н., Борисов А.В., Дымов А.А.; верификация данных – Вахрушев Л.А., Борисов А.В., Дымов А.А.; формальный анализ – Вахрушев Л.А.; проведение исследования – Вахрушев Л.А., Карманов В.Н., Недомолкина Н.Г.; ресурсы – Борисов А.В., Дымов А.А.; создание черновика рукописи – Вахрушев Л.А.; создание рукописи и ее редактирование – Вахрушев Л.А., Карманов В.Н., Борисов А.В., Дымов А.А.; администрирование проекта – Карманов В.Н., Борисов А.В., Дымов А.А.; руководство исследованием – Карманов В.Н., Дымов А.А.; получение финансирования – Карманов В.Н., Дымов А.А.; визуализация – Вахрушев Л.А., Карманов В.Н.

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

Заявление об использовании технологий искусственного интеллекта. При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовались.

Заявление о доступности данных.

Данные доступны по запросу (у авторов).

Acknowledgments.

The research was funded by the GB topics “Soils and Soil Resources of the European North-East of Russia in the Context of Modern Climate Change, Anthropogenic Pressure, and Socio-Economic Challenges” (No. 125021902454-1) and “Discovery, study and preservation of the archaeological heritage of the north-east of the Russian Plain” (No. 126021217116-6).

Authors' contributions. conceptualization – Vakhrushev L.A., Karmanov V.N., Dymov A.A.; methodology – Karmanov V.N., Borisov A.V., Dymov A.A.; validation – Vakhrushev L.A., Borisov A.V., Dymov A.A.; formal analysis – Vakhrushev L.A.; investigation – Vakhrushev L.A., Karmanov V.N., Nedomolkina N.G.; resources – Borisov A.V., Dymov A.A.; writing original draft – Vakhrushev L.A.; writing, review & editing – Vakhrushev L.A., Karmanov V.N., Borisov A.V., Dymov A.A.; project administration – Karmanov V.N., Borisov A.V., Dymov A.A.; supervision – Karmanov V.N., Dymov A.A.; funding acquisition – Karmanov V.N., Dymov A.A.; visualization – Vakhrushev L.A., Karmanov V.N..

Conflicts of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Statement on the use of artificial intelligence technologies.

No generative artificial intelligence technologies were used in the creation of this article.

Data availability.

The data are available upon request (from the authors).

**Химические свойства и биологическая
активность почв с включенным культурным
слоем в условиях средней тайги Восточно-
Европейской равнины**

© 2026 г. Л. А. Вахрушев^{1,2*}, В. Н. Карманов^{3**},
А. В. Борисов^{4***}, Н. Г. Недомолкина^{5****},
А. А. Дымов^{2*****}

¹Сыктывкарский государственный университет
им. Питирима Сорокина, Россия,
167001, Сыктывкар, Октябрьский пр., 55,

*<https://orcid.org/0009-0003-0479-6122>, e-mail: l_vakhrushev@inbox.ru,

²*Институт биологии ФИЦ Коми научного центра УрО РАН, Россия,
167982, Сыктывкар, ул. Коммунистическая, 28,
**** <https://orcid.org/0000-0002-1284-082X>.*

³*Институт языка, литературы и истории
ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Россия,
167982, Сыктывкар, ул. Коммунистическая, 26,
** <https://orcid.org/0000-0002-5091-501X>.*

⁴*Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения
Российской академии наук, Россия,
142290, Московская обл., г. Пушкино, ул. Институтская, д. 2а,
*** <https://orcid.org/0000-0001-5031-7477>.*

⁵*Вологодский государственный историко-художественный
музей-заповедник, Россия,
160000, Вологда, ул. С. Орлова, д. 15,
**** <https://orcid.org/0000-0003-4184-9441>.*

*Поступила в редакцию 18.08.2025, после доработки 23.09.2025,
принята к публикации 21.08.2026*

Резюме: Проведено исследование морфологических, химических и микробиологических свойств почв на стоянке раннего неолита Усть-Дароватка (втор. пол. VI тыс. до н. э.) (Верховажский район Вологодской области, д. Мокиевская). Объект располагается в Коношско-Няндомском округе подзолистых и торфян(ист)о-подзолисто-глеевых почв суглинистых и часто сменяющегося гранулометрического состава с преобладанием суглинистых на моренных отложениях, местами перекрытых песками и супесями. Показано, что в условиях средней тайги в почвах сохраняются признаки, диагностирующие особенности антропогенных преобразований в древности в течение нескольких тысячелетий. Данные магнитной восприимчивости можно использовать в качестве диагностирующих признаков мест разведения огня, либо привнесения пирогенного материала извне, в тех случаях, когда требуется доказательная интерпретация археологических наблюдений. Показано, что на памятниках археологии высокая активность фермента фосфатазы может сохраняться в культурных слоях, заключенных в песчаные почвы средней тайги, на протяжении нескольких тысячелетий и может быть использована в качестве индикатора при оценке характера антропогенного воздействия в прошлом. Также в почвах памятника установлены повышенные значения содержания фосфора в местах антропогенной нагрузки. Данные показатели могут являться индикатором захоронений, мест приготовления пищи. Активность фермента уреазы оказалась менее информативной для исследования

археологических объектов. Был проведен статистический анализ сравнения гранулометрического состава, физических и химических показателей. Сравнения проведены с условно-фоновыми разрезами, в которых не было обнаружено археологических артефактов. В итоге работы представлены результаты о значимости почвенных показателей для расширения базы знаний о памятниках археологии.

Ключевые слова: археологический памятник; подзолы; магнитная восприимчивость; фосфаты; активность ферментов.

Chemical properties and biological activity of soils with an incorporated cultural layer in the conditions of the middle taiga of the East European Plain

© 2026 L. A. Vakhrushev^{1,2*}, V. N. Karmanov^{3**},
A. V. Borisov^{4***}, N. G. Nedomolkina^{5****}, A. A. Dymov^{2*****}

¹Pitirim Sorokin Syktyvkar State Universit,
55 Oktyabrsky Ave., Syktyvkar 167001, Russian Federation,
*<https://orcid.org/0009-0003-0479-6122>, e-mail: l_vakhrushev@inbox.ru,

²Institute of Biology of the Federal Research Center of the Komi Science Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
28, Kommunisticheskaya Str., Syktyvkar 167982, Russian Federation,

<https://orcid.org/0000-0002-1284-082X>.

³Institute of Language, Literature and History
of the Federal Research Center of the Komi Science Center
of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
26, Kommunisticheskaya Str., Syktyvkar 167982, Russian Federation,
**
<https://orcid.org/0000-0002-5091-501X>.

⁴Institute of Physicochemical and Biological Problems of Soil Science
of the Russian Academy of Sciences,
2a Institutskaya Str., Pushchino 142290, Russian Federation,

<https://orcid.org/0000-0001-5031-7477>.

⁵Vologda State Historical and Art Museum-Reserve,
15 S. Orlova Str., Vologda 160000, Russian Federation,

<https://orcid.org/0000-0003-4184-9441>.

Received 18.08.2025, Revised 23.09.2025, Accepted 21.08.2026

Abstract: A study of the morphological, chemical, and microbiological properties of soils at the Ust-Darovatka Early Neolithic site (deut. VI

millennium BC) (Verkhovazhsky district of the Vologda region Mokievskaya street). The object is located in the Konoshsko-Nyandomsky district of podzolic and peat (east) o-podzolic-gley soils of loamy and often changing granulometric composition with a predominance of loamy on moraine deposits, sometimes overlain by sands and sandy loams. It has been shown that under the conditions of the middle taiga, the soils retain features that diagnose the characteristics of anthropogenic transformations that occurred several millennia ago. The data on magnetic susceptibility can be used as diagnostic features of places where fires were lit or where pyrogenic material was introduced from outside, in cases where an evidence-based interpretation of archaeological observations is required. It has been shown that in archaeological sites, the high activity of the enzyme phosphatase can be preserved in the cultural layers. Also, in the soils of the site, elevated phosphorus content values were found in areas of anthropogenic load. These indicators may serve as a marker of burials and food preparation sites. The activity of the enzyme urease proved to be less informative for the study of archaeological objects. A statistical analysis was conducted to compare the granulometric composition, physical and chemical indicators. The comparisons were made with conditionally background soil profiles in which no archaeological artifacts were found. Ultimately, the work presents results on the significance of soil indicators for expanding the knowledge base about archaeological sites.

Keywords: archaeological site; cultural layer; podzols; magnetic susceptibility; phosphates; enzyme activity.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время достаточно хорошо изучены почвы эталонных, мало нарушенных ландшафтов европейского Севера. Выявлены зональные особенности и принадлежность определенных растительных ассоциаций к отдельным почвам и почвообразующим породам (Атлас почв Республики Коми, 2010; Dymov et al., 2022; Startsev et al., 2022; Бобкова и др., 2015). Подробно описаны их изменения в результате современной хозяйственной деятельности и сукцессионных преобразований, затрагивающих первые годы и десятилетия трансформации (Дымов, 2020). Но при этом для северных регионов России практически не изученными остаются свойства почв, связанные с антропогенным освоением в древности. Почвы содержат значительный объем информации о первона-

чальных этапах заселения и особенностях землепользования (Ли-сецкий и др., 2023; Якимов, 2023).

В предыдущее десятилетие было сформировано новое направление в науке – “Археологическое почвоведение”. Активно развиваются исследования феномена отражения в почвенной памяти естественных или антропогенных условий почвообразования в прошлом. С помощью определения химического состава, физических свойств почв и микробиологических параметров можно диагностировать этапы антропогенной эволюции почв и выявлять особенности культуровмещающих отложений на месте древних поселений. Одной из важнейших диагностических характеристик антропогенного воздействия является содержание фосфатов (Holliday, Gartner, 2007). Практически все формы антропогенного воздействия на почву – селитебное, земледельческое и скотоводческое освоение территории в древности – приводят к возрастанию содержания фосфатов, и эти изменения сохраняются до наших дней (Александровский и др., 2007; Александровский, 2025; Майгьер и др., 2014; Сверчкова, 2022). Значения содержания фосфатов в культурном слое могут превышать фоновые показатели в десятки и сотни раз (Борисов, 2016; Борисов и др., 2016; Колесников, 2022; Потапова, Каширская, 2021; Потапова и др., 2020; Чечушков и др., 2021).

Среди микробиологических методов широкое применение для диагностики следов древних антропогенных трансформаций почв получили методы оценки ферментативной активности. Важную диагностическую роль играет величина фосфатазной активности, которая в зональных почвах изменяется от 2.8 до 287 мкг P_2O_5 /г/ч (Каширская и др., 2020). Фосфатазы относятся к классу гидролаз и участвуют в мобилизации доступного минерального фосфора для растений (Ахмедова и др., 2014). С этим связана зависимость между активностью фосфатазы и содержанием минерального фосфора в почве: чем больше органических фосфатов, тем более высокая фосфатазная активность. При значительном содержании минеральных фосфатов активность фосфатазы, как правило, низкая (Каширская и др., 2020).

Еще одним индикатором древней антропогенной деятельности является величина уреазной активности (Чернышева и др.,

2014). Высокие показатели активности уреазы могут служить маркером для определения зон обитания человека или указывать на места загонов для скота (Борисов и др., 2016). К примеру, в работах по изучению биологической активности дерново-карбонатных почв на аланских поселениях Кисловодской котловины были обнаружены высокие показатели уреазной активности, достигающие значений 187 мкг/г/час. Для сравнения, в современных местах выпаса скота уреазная активность составляет 136 мкг/г/час. Повышение данного показателя может быть связано с внесением органических удобрений, например, таких как навоз, растительные остатки и отходы скотоводства. При этом в местах с повышенными значениями уреазной активности зачастую наблюдается обогащение фосфатами (Борисов и др., 2017; Чернышева и др., 2014).

Важную индикационную роль при выявлении термического воздействия на почву в прошлом выполняет магнитная восприимчивость (Алексеев, Алексеева, 2012; Fassbinder, 2015; Fassbinder et al., 1990). Это физическая величина, которая зависит от содержания минералов, проявляющих магнитные свойства (Снопков, 2016; Fassbinder, 2023). В почвах археологических памятниках магнитная восприимчивость возрастает при воздействии огня за счет неосинтеза магнетита при прокаливании (Фассбиндер, 2019), либо при поступлении в почву пирогенного материала (Коробов, Борисов, 2020). Следовательно, можно предположить, что повышение магнитной восприимчивости может увеличиться не только в месте расположения очага, но и в различных других объектах, где были привнесены материалы, подвергшиеся термическому воздействию.

Таким образом, использование методов почвоведения и почвенной микробиологии при изучении почв и культурных слоев археологических памятников позволяет расширить наши представления о феномене почвенной “памяти” (Таргульян, 2019). При этом большинство работ по изучению свойств культурных слоев затрагивает территорию смешанных лесов (Бобровский, 2010), лесостепи и степи (Гольева, Сыроватко, 2022; Зах, Еньшин, 2015; Ковалева и др., 2021; Плеханова, 2019; Хохлова и др., 2019). В зоне бореальных лесов работы по изучению почв и культуровмещающих отложений на месте древних поселений единичны (Вах-

рушев и др., 2025; Колесникова и др., 2020; Ковалева и др., 2021; Смирнов и др., 2023). В то же время единичные работы почвоведов на археологических памятниках Севера (Низамутдинов и др., 2023; Пошехонова и др., 2015) показывают перспективность изучения культурных слоев поселений в контексте расширения наших представлений о сохранении в “памяти” почв информации об условиях почвообразования в прошлом в различных природных зонах. В целом, следует отметить, что вопросы функционирования почвенной памяти в специфических условиях почвообразования средней тайги, таких как резко континентальный климат, промывной водный режим, смещение pH почвенного раствора в кислую область, легкие почвообразующие породы и др., до настоящего времени остаются мало исследованными.

В связи с этим цель данной работы заключалась в изучении физико-химических и микробиологических показателей песчаных почв средней тайги с включенным культурным слоем, развитым на месте поселения, существовавшего около 8 тыс. лет назад.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Стоянка Усть-Дароватка находится на левом берегу р. Пежма вблизи д. Мокиевская Верховажского района Вологодской области, 60.77° с. ш., 41.69° в. д. (рис. 1). Она расположена на эоловой дюне, сформированной на поверхности надпойменной террасы высотой 3.2 м от уровня воды в р. Пежме. Аллювиальные отложения лежат на основании, сложенном валунами и крупной галькой. Терраса и дюна на ней подвергались боковой эрозии р. Пежмы. С учетом положения правого противоположного борта долины реки и средней ширины ее русла определено, что боковой эрозией могла быть разрушена полоса террасы шириной не более 10 м.

Согласно почвенно-географическому районированию (Урусевская и др., 2020), объект располагается в Коношско-Няндомском округе подзолистых и торфянисто-подзолистых суглинистых почв часто сменяющегося гранулометрического состава с преобладанием суглинистых на моренных отложениях, местами перекрытых песками и супесями. На территории стоянки преобладают песчаные и супесчаные почвообразующие

породы, подстилаемые с глубины около 80 см суглинистыми отложениями. Среднегодовая температура составляет -3.7°C . Количество осадков в данной местности примерно 600 мм. Тип леса – сосняк чернично-зеленомошный. Преобладающие почвы – подзолы иллювиально-железистые на песках, подстилаемых суглинистыми отложениями.

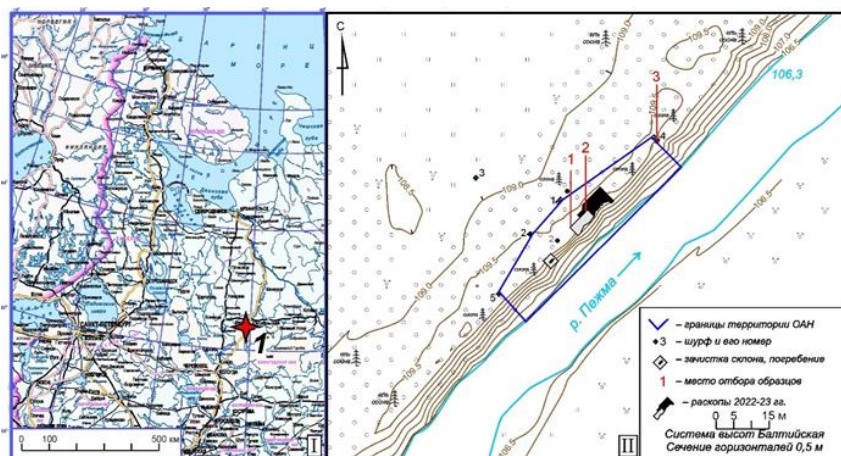


Рис. 1. Расположение объектов исследования. I – стоянка Усть-Дароватка на карте; II – ситуационный план памятника и места отбора образцов.

Fig. 1. Location of the research objects. I – Ust-Darovatka site on the map; II – situational plan of the monument and sampling sites.

Поверхность дюны, прилегающая к месту раскопа, вероятно, распахивалась в неопределенное время, скорее всего, не позднее 100 лет назад. Данное предположение подтверждается более молодым древостоем и более ровной границей верхних горизонтов, подтверждающее применением пахотного орудия с наральником, следы которого выявлены в прилегающих к раскопу разрезах. В них пахотный слой, представленный серым гумусированным супесчаным горизонтом, имел мощность в среднем 17 см.

Древесная растительность в пределах памятника в основном представлена сосной *Pinus sylvestris* L. В напочвенном покрове

преобладает брусника *Vaccinium vitis-idaea* L., черника *Vaccinium myrtillus* L. и зеленые мхи.

Стоянка Усть-Дароватка была открыта в 1996 г. Н.Г. Недомолкиной, которой была произведена зачистка обнажения берега шириной 1 м, обнаружены следы очага, многочисленные обломки кальцинированных костей и некремнистых пород (Недомолкина, 2014). Исследования памятника возобновлены в 2022–2023 гг. В.Н. Кармановым при участии Н.Г. Недомолкиной.

В результате раскопок стоянки Усть-Дароватка на площади 55 кв. м изучены два археологических объекта. Первый – неопределенное теплотехническое сооружение, разобранное в древности (разрез 2, “Объект 1”). К нему были приурочены многочисленные фрагменты кальцинированных костей, обломки некремнистых пород и большая часть каменного инвентаря.

Вторая структура (разрез 1, “Объект 2”) – следы очага в виде прокаленного грунта, которому соответствовало скопление мелких обломков кальцинированных костей, а вокруг него залегали обломки некремнистых пород и кремневые артефакты (рис. 2). Конструктивное оформление отсутствовало или было разобрано в древности.

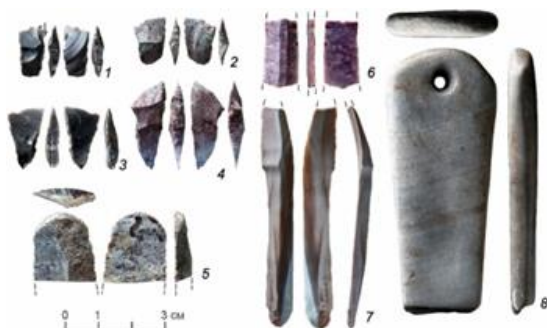


Рис. 2. Каменный инвентарь, обнаруженный на стоянке. 1–4 – геометрические микролиты; 5 – скребок; 6, 7 – пластины; 8 – обломанный кинжал и/или подвеска. 1–7 – кремень; 8 – некремнистые породы.

Fig. 2. Stone tools found at the site. 1–4 – geometric microblades; 5 – scraper; 6, 7 – blades; 8 – broken dagger and/or pendant. 1–7 – flint; 8 – non-flint rocks.

Пространственное распределение находок вокруг очага может указывать на наличие здесь наземного малого жилища типа чума (рис. 3).

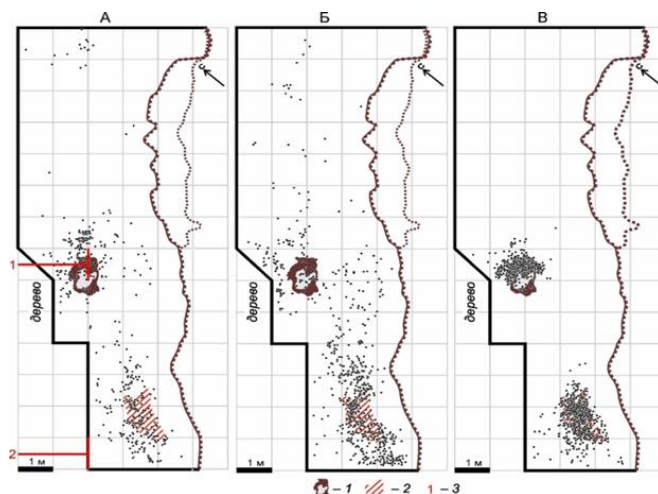


Рис. 3. Планиграфия стоянки Усть-Дароватка: **А** – кремневого инвентаря; **Б** – обломков некремнистых пород; **В** – обломков кальцинированных костей. 1 – следы очага; 2 – следы производственной деятельности; 3 – места отбора образцов.

Fig. 3. Planigraphy of the Ust-Darovatka site: **А** – flint tools; **Б** – fragments of non-flint rocks; **В** – fragments of calcified bones. 1 – traces of a hearth; 2 – traces of production activities; 3 – sample collection sites.

На основании анализа археологического материала памятник интерпретирован как стоянка энтьейского типа раннего неолита и датируется второй половиной VI тыс. до н. э. (Карманов и др., 2019; Логинова, 2018).

Почвенные профили, используемые для физико-химического и микробиологического анализа, были выбраны в соответствии с наличием или отсутствием в них археологических предметов или следов температурного воздействия. Отбор образцов почв осуществляли из трех почвенных профилей (рис. 4). В северо-западной стенке раскопа 2022 г. изучены отложения в двух

разрезах: разрез 1 – в отложениях объекта 2, разрез 2 – вблизи объекта 1. Для отбора условно-фоновой почвы был заложен разрез 3, расположенный в 11 м к северо-востоку от раскопов 2022–23 гг., и в котором не обнаружены признаки культурного слоя и археологические предметы (рис. 4).

Все химические и микробиологические анализы были проведены на базе ФИЦ “Пушкинского научного центра биологических исследований РАН” в лаборатории археологического почвоведения.

В образцах было определено валовое содержание фосфора по методу прокаливания Сандерса и Уильямса (Корченкина и др., 2015; Sanders, Williams, 1955). Магнитную восприимчивость измеряли с помощью прибора КТ-5 (SatisGeo). Фосфатазную активность определяли по методу Галстяна–Арутюнян. Для этого 1 г воздушно-сухой почвы помещали в колбу 50 мл, добавляли 5 мл воды и обрабатывали ультразвуком в течение 15 с. Затем добавляли 2 мл 1%-ного р-ра фенолфталеинфосфата натрия и встряхивали на качалке. Пробу инкубировали от 30 мин до 4 часов в зависимости от образца (чем выше фосфатазная активность, тем меньше время инкубации). После этого в колбу добавляли 2 мл насыщенного р-ра алюмокалиевых квасцов, 39 мл воды и 2 мл 10%-ного р-ра аммиака. После этого суспензию фильтровали и измеряли ее оптическую плотность при 553 нм (Каширская, Борисов, 2018).

Уреазную активность определяли по методу Хазиева. Для этого навеску почвы в 1 г заливали 6 мл боратного буфера, после перемешивания в каждую колбу было добавлено 0.5 мл 10.4 М раствора мочевины. Затем пробы инкубировали, после в каждую колбу добавляли 13.5 мл 1 М КСl для вытеснения образовавшихся ионов NH_4^+ из почвы. Далее суспензию фильтровали через фильтр “синяя лента”. К 1 мл фильтрата последовательно добавляли 10 мл воды, 3 мл 0.2 М р-ра NaOH, 5 мл салицилата с нитропруссидом натрия, 2 мл дихлоризоцианурата натрия. Через 20 минут измеряли оптическую плотность при 690 нм (Kandeler, 1988). Оценку микробной биомассы проводили методом субстрат-индуцированного дыхания (Ананьевна и др., 2011).

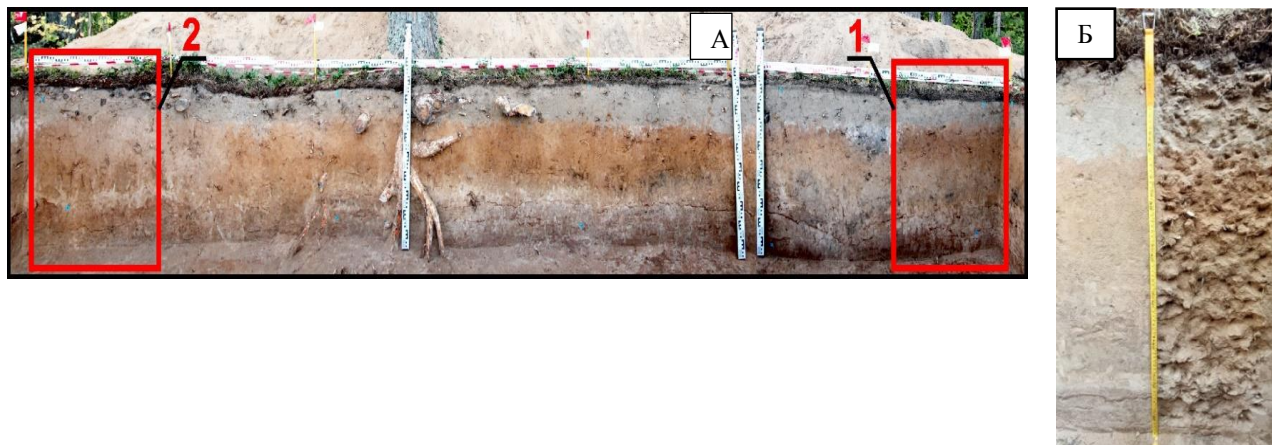


Рис. 4. А – Северо-западный борт раскопа 2022 г. с указанием мест расположения разрезов (разрезы 1 и 2),
Б – фотография условно-фонового разреза (разрез № 3).

Fig. 4. А – The northwestern side of the 2022 excavation site, showing the locations of the soil pits (pits 1 and 2), and
Б – a photograph of the background soil pit (pit 3).

Полученные результаты были статистически проанализированы с использованием Microsoft Excel 2010 и STATISTICA 10. Проведен анализ взаимосвязей значений физических и химических свойств почв. Составлены корреляционные таблицы коэффициентов корреляции Пирсона r при уровне значимости $p < 0.05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исследуемые почвы характеризуются близким строением. Они представлены подзолами иллювиально-железистыми на песках, в отдельных случаях подстилаемых суглинистыми отложениями (Albic Podzols и Glosic Abruptic Retisols).

Для верхних горизонтов почв характерно типичное морфологическое строение: под лесной подстилкой (О) залегает мощный, наиболее светлый в профиле подзолистый горизонт (Е). Под ним формируется иллювиально-железистый горизонт ВF, плавно переходящий в горизонты почвообразующей породы (BC). В разрезах 1 и 2 с глубины около 80 см наблюдается подстиление суглинками, верхняя часть которых облежена (гор. BEL), ниже расположен текстурно-дифференцированный горизонт (BT). Образцы для анализа отбирали до глубины 80 см, которые были представлены песчаными и супесчаными отложениями.

Профиль разреза 1 состоит из лесной подстилки О (0–7 см), под которой расположен супесчаный, бесструктурный подзолистый горизонт мощностью 7–17 см, верхняя часть которого характеризуется светло-серым цветом (Ehi) благодаря пропитке потечным органическим веществом. Нижняя часть подзолистого горизонта (Е) характеризуется белесой окраской. В верхнюю часть песчаного бесструктурного иллювиального горизонта (BF), расположенного на глубине 17–45 см, инкрустирован ярко-коричневый горизонт со следами прокаливания (BFur) с обилием кальцинированных костей и археологических предметов. На глубине 45–60 см расположен супесчаный горизонт BCруг, характеризующийся присутствием фрагментов древесных углей от древнего лесного пожара. Ниже, на глубине 60–85 см расположен неоднородный по гранулометрическому составу субэлювиальный горизонт BEL, плавно переходящий в суглинистый горизонт BT (85–95 см).

Строение профиля разреза 2: О (0–7 см) – Ehi (7–25 см) – BF (25–40 см) – BEL (40–60 см) – BT (60–100 см). Профиль почвы состоит из грубогумусированной подстилки, под которой формируется супесчаный подзолистый горизонт (Ehi), пропитанный почечным гумусом. Ниже залегает светло-желтый супесчаный иллювиально-железистый гор. BF, плавно переходящий в горизонты BEL и BT.

Строение профиля разреза № 3: О (0–7 см) – Ehi (7–19 см) – BF (19–49 см) – BC (49–60 см) – C (60–85 см). Строение профиля в целом совпадает со строением разреза 2, но в отличие от предыдущего разреза не выявлено подстилки суглинистыми породами. В данном разрезе не было обнаружено каких-либо признаков археологических объектов, и его можно обозначить как условно-фоновый (рис. 5).

В разрезе 1 наблюдается резкое повышение содержания фосфора на глубине 23 см, составляющее 2.4 мг P_2O_5 на грамм почвы. Далее на глубине 70 см обнаруживается второй пик с содержанием фосфора 1.7 мг P_2O_5 на грамм. В данном разрезе максимальное значение фосфатазной активности наблюдается на глубинах 6 и 23 см. Показатели равны 9.9 и 10.0 мкг P_2O_5 /г/час. Пик уреазной активности обнаруживается в верхних горизонтах и резко понижается с увеличением глубины. Наибольший показатель выявлен в элювиальном горизонте – 91.2 мкг NH_4 /г/час.

Минимальные значения микробной биомассы выявлены в горизонте со следами прокаливания (BFur), максимальные в горизонте BF. Верхние горизонты Ehi и E характеризуются высокими значениями микробной биомассы. Магнитная восприимчивость возрастает в горизонтах BF и BFur до значений 1.09×10^{-3} ед. СИ.

В разрезе 2 содержание фосфора соответствует элювиально-иллювиальному распределению. Максимальное содержание выявлено в иллювиально-железистом горизонте – 1.8 мг P_2O_5 на грамм почвы. Максимальное значение (7.7 мкг P_2O_5 /г/час) активности фосфатазы соответствует горизонту Ehi. Активность фосфатазы плавно уменьшается с глубиной вниз по профилю. Наиболее высокие показатели уреазной активности (77.6 мкг NH_4 /г/час) характерны для верхнего горизонта. Некоторое возрастание характерно для иллювиально-железистого горизонта (65.8 мкг NH_4 /г/час).

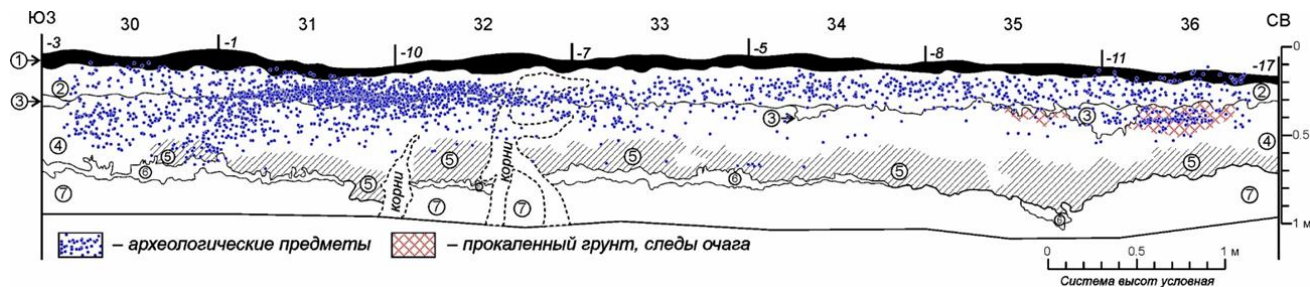


Рис. 5. Схематическое обозначение стенки раскопа. Обозначение горизонтов: 1 – гор. О; 2 – гор. Ehi; 3 – гор. E; 4 – гор. BF; 5 – гор. BCpyr; 6 – гор. BEL; 7 – гор. BT.

Fig. 5. Schematic designation of the soil pit wall. Designation of soil horizons: 1 – O; 2 – Ehi; 3 – E; 4 – BF; 5 – BCpyr; 6 – BEL; 7 – BT.

Показатели микробного дыхания плавно уменьшаются с глубиной. Магнитная восприимчивость в данном разрезе имеет равномерное профильное распределение почти по всему профилю, средние значения – примерно 0.30×10^{-3} ед. СИ.

Профильное распределение фосфора в условно-фоновом разрезе (разрез 3) соответствует элювиально-иллювиальному типу, с максимальным значением, достигающим 1.8 мг P_2O_5 на грамм почвы в горизонте BF. Наибольший показатель фосфатазной активности наблюдается в иллювиально-железистом горизонте 9.3 мкг P_2O_5 /г/час. Уреазная активность, так же, как и в других разрезах, имеет максимальное значение в верхних горизонтах и составляет 71.3 мкг NH_4 /г/час. Распределение в нижних минеральных горизонтах равномерное. Магнитная восприимчивость в различных горизонтах профиля имеет средний показатель 0.25×10^{-3} ед. СИ.

По основным морфологическим свойствам генетические горизонты, вмещающие культурные слои и археологические артефакты, близки к соответствующим горизонтам условно-фоновых почв. Основные отличия проявляются в наличии археологических предметов (рис. 5), которые встречаются в подзолистом горизонте и в верхней части иллювиально-железистого горизонта и могут служить четкими индикаторами особенностей антропогенного воздействия, а в некоторых случаях и его интенсивности.

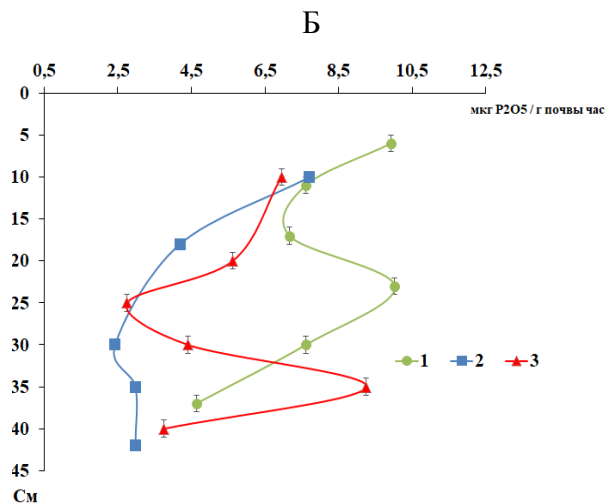
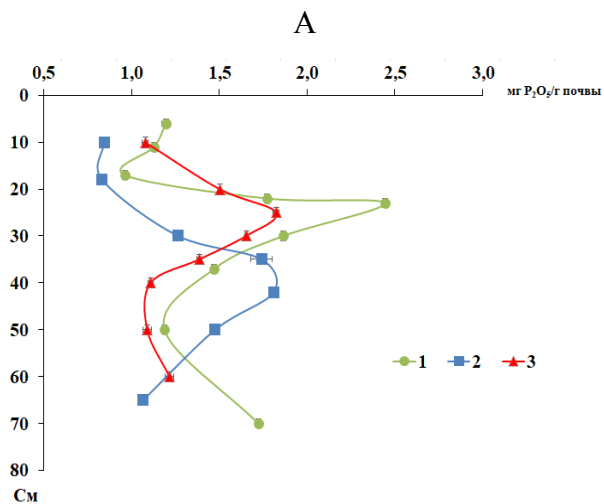
Важным индикатором антропогенной деятельности является содержание фосфора в почвенных горизонтах. При этом в бедных песчаных почвах возрастание в результате древней антропогенной деятельности может быть более наглядным индикатором по сравнению с более богатыми суглинистыми почвами. Содержание фосфора в исследуемых нами почвах имеет близкое значение для соответствующих горизонтов. Все почвы характеризуются элювиально-иллювиальным типом распределения. Во всех разрезах выявлено его накопление в иллювиально-железистых горизонтах. При этом максимальное значение выявлено для горизонта BFur, характеризующегося наличием кальцинированных костей и археологических предметов, в 1.4 раза превышающее показатели соответствующего горизонта условно-фоновых ландшафтов. Синхронно в этом же горизонте возрастает и фосфатазная активность.

Повышение фосфатазной активности (рис. 6) может свидетельствовать о возрастании в анализируемом горизонте почвы органических фосфор-содержащих соединений (Каширская и др., 2020).

Схожие результаты по возрастанию фосфора были опубликованы в работе А.А. Гольевой с соавторами (Гольева, Турова, 2015). На примере раскопок, проводимых на памятнике Сосновка IV, выявлено повышение концентрации фосфора на глубине 20–30 см. В работе Р.Р. Сулейманова и др. (Сулейманов и др., 2020) показано возрастание фосфора в верхних слоях почв. Самое большое его количество наблюдалось на глубине 30–40 см (почва – темно-серая (Phaeozems) с включениями материала, перемещенного человеком). Схожим для всех исследований является уменьшение концентрации элемента с глубиной. Отмеченное возрастание фосфатазной активности в культурносодержащих слоях аналогично ранее описанным результатам Т.Э. Хомутовой (Хомутова и др., 2012) и Т.Н. Смекаловой (Смекалова и др., 2021). В этих работах величина фосфатазной активности составляет в среднем около 40–80 мкг P_2O_5 /г/ч, со временем при хранении она может увеличиваться или уменьшаться в зависимости от того, будут ли внесены в будущем в почву органические остатки.

Для разрезов 2 и 3 возрастание содержания фосфора и фосфатазы менее выражено в иллювиальных горизонтах, и не во всех случаях сопровождается возрастанием фосфатазой активности.

Уреазная активность всех трех разрезов резко уменьшается с глубиной. Но при этом диагностируются небольшие пики на глубине от 25 до 35 см, что соответствует уровню культуровмещающих отложений. Следует отметить, что высокие показатели уреазной активности в основном наблюдаются на памятниках более южных территорий, где происходил активный выпас скота. Так, в работе Е.В. Чернышовой (Чернышева и др., 2014) на местах обитания возрастом более 1500 л. н. уреазная активность составляет 187 мкг / г почвы в час. В почвах бореальных лесов такие показатели определяются редко. В разрезе 1 уреазная активность составляет 44–91 мкг / г почвы в час в разрезе 2 54–77 мкг / г почвы в час, в фоновом разрезе показатели равны 54–70 мкг / г почвы в час.



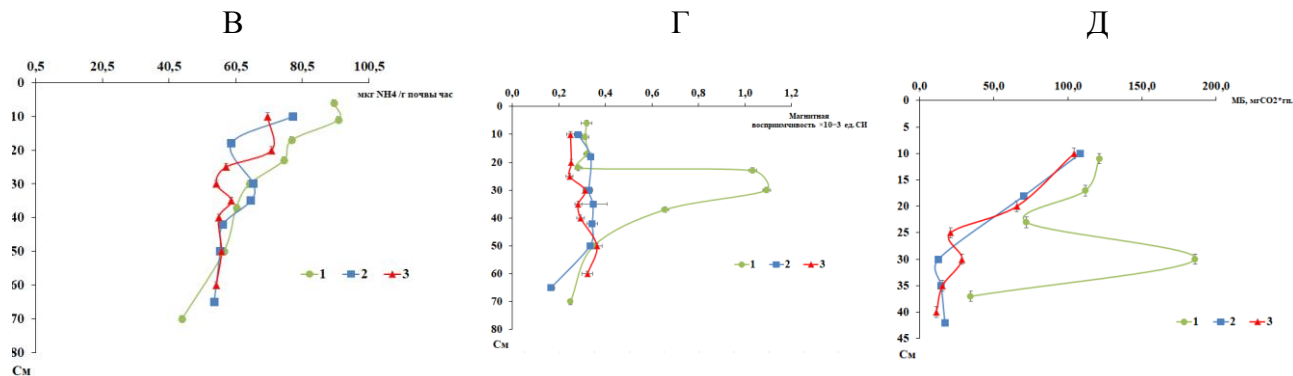


Рис. 6. Профильное распределение некоторых физико-химических и микробиологических свойств. Обозначения: А – фосфор, Б – активность фосфатазы, В – активность уреазы, Г – магнитная восприимчивость, Д – микробная биомасса. 1 – разрез 1 (“Жилище”), 2 – разрез 2 (“Производственная площадка”), 3 – (разрез 3) фоновая почва.

Fig. 6. Profile distribution of some physical-chemical and microbiological properties. Designations: А – phosphorus, Б – phosphatase activity, В – urease activity, Г – magnetic susceptibility, Д – microbial biomass. 1 – soil pit 1 (“Dwelling”), 2 – soil pit 2 (“Production site”), 3 – (soil pit 3) background soil.

Профильное распределение микробной биомассы синхронно профильному распределению показателей ферментативной активности. Весьма показательно существенное возрастание данного показателя в горизонте BFug разреза 1 (рис. 6). Причиной этого может быть поступление значительных объемов органических материалов в период существования поселения, что обусловило рост численности КОЕ почвенных микроорганизмов, участвующих в разложении органики (Каширская и др., 2020).

Выявлена важная диагностическая роль магнитной восприимчивости, значения которой являются чувствительным показателем высокотемпературного воздействия. Наиболее четко это проявляется при оценке показателей разреза 1, в котором, согласно археологическим находкам, можно диагностировать элементы очага. В месте его развития (горизонт BFug) выявлено трехкратное возрастание магнитной восприимчивости по сравнению с вмещающими и подстилаемыми горизонтами (рис. 6). Возрастание величины магнитной восприимчивости при разведении кострищ на археологических памятниках в семиаридных и аридных регионах с суглинистыми почвами и сохранение высоких значений этого показателя хорошо известно (Кулакова и др., 2021), но для песчаных таежных почв этот эффект выявлен впервые.

Статистический анализ (табл. 1) позволил выявить, что в разрезе № 1 (“Жилище”) магнитная восприимчивость коррелирует с содержанием фосфатов ($r = 0.91$).

Вероятно, в данном случае природа фосфатов и причина возрастания магнитной восприимчивости связаны с проживанием и приготовлением пищи, при этом неизбежно поступление в почву больших объемов остатков фосфор-содержащих продуктов питания и бытового мусора и термическое воздействие, что обуславливает увеличение магнитной восприимчивости.

Несколько иная ситуация наблюдается в разрезе 2 (“Производственная площадка”). На данном участке выявлена тесная обратная корреляция величины магнитной восприимчивости и ферментативной активности (табл. 1).

Таблица 1. Корреляция (коэффициент Пирсона r) рассматриваемых физико-химических свойств и биологической активности почв

Table 1. Correlation (Pearson's r coefficient) between the physicochemical properties and biological activity of the soils under study

Объект	Параметр	Активность фосфатазы	Фосфор	Активность уреазы	Магнитная восприимчивость	МБ
Объект № 2	Активность фосфатазы	1.00				
	Фосфор	0.34	1.00			
	Активность уреазы	0.59	-0.44	1.00		
	Магнитная восприимчивость	0.09	0.91	-0.68	1.00	
	МБ	0.29	-0.07	0.17	0.18	1.00
Объект № 1	Активность фосфатазы	1.00				
	Фосфор	-0.67	1.00			
	Активность уреазы	0.76	-0.48	1.00		
	Магнитная восприимчивость	-0.91	0.67	-0.88	1.00	
	МБ	0.95	-0.83	0.61	-0.83	1.00
Фон	Активность фосфатазы	1.00				
	Фосфор	-0.41	1.00			
	Активность уреазы	0.39	-0.30	1.00		
	Магнитная восприимчивость	-0.01	-0.04	-0.70	1.00	
	МБ	0.27	-0.38	0.88	-0.55	1.00

Очевидно, хозяйственная деятельность в данном случае исключала поступление в почву органических материалов (возможно также сознательное удаление подстилки) при явном высокотемпературном воздействии. При любых условиях в итоге имело место снижение активности ферментов фосфатазы и уреазы.

В условно-фоновой почве статистически значимые корреляции выявлены между уреазной активностью и микробной биомассой, что характерно для естественных не нарушенных антропогенной деятельностью почв (Чернышева и др., 2014).

ВЫВОДЫ

Почвы бореальных лесов могут сохранять информацию об антропогенных воздействиях, произошедших 8 тыс. лет назад, при этом следы бытовой и производственной деятельности человека в прошлом выявляются на морфологическом уровне, на уровне физико-химических свойств и биологической активности. Наиболее важными морфологическими показателями являются присутствие артефактов, изменение цвета и мощности генетических горизонтов. Учитывая, что на момент функционирования поселения все артефакты поступали в поверхностный горизонт почвы, современное положение археологического материала в профиле почвы выступает в качестве стратиграфического маркера, отражающего рост почвенного профиля за период после прекращения функционирования памятника до настоящего времени.

Морфологические признаки антропогенных трансформаций почв подтверждаются химическими и физическими характеристиками почвенных горизонтов. Наиболее информативными оказались содержание и формы фосфатов, величина микробной биомассы, активность фермента фосфатазы и магнитная восприимчивость. Данные показатели существенно возрасли во вмещающих горизонтах, характеризующихся присутствием артефактов.

Таким образом полученные данные расширяют представления о функционировании почвенной памяти и позволяют говорить о том, что в почвах в зоне средней тайги в условиях промывного водного режима и легкого гранулометрического состава сохраняются основные морфологические, физико-химические и микробиологические признаки антропогенного этапа эволюции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атлас почв Республики Коми; Забоева, И.В.; Таскаева, А.И.; Добровольский, Г.В.; Елькина, Г.Я.; Каверин, Д.А.; Лодыгин, Е.Д.; Оберман, Н.Г.; Лаптева, Е.М.; Русанова, Г.В.; Никитин, Е.Д.; Арчегова, И.Б.; Жангуров, Е.В.; Панюков, А.Н.; Пвстухов, А.В.; Лиханова, И.А.; Симонов, Г.А.; Мажитова, Г.Г.; Втюрин, Г.М.; Казаков, В.Г.; Елсаков, В.В.; Рыбин, Л.Н.; Мокиев, В.В.; Кондратенко, Б.М.; Добровольский, Г.В.; Таскаева, А.И.; Забоева, И.В. (ред.). Сыктывкар, 2010. 356 с.
2. Александровская, Е.И.; Александровский, А.Л. *Антропохимия*; Класс-М: Москва, 2007. 245 с.
3. Александровский, А.Л. Почвы и культурный слой поселения Вознесенское I. *Археология Евразийских Степей* **2025**, (2), 202–210. <https://doi.org/10.24852/2587-6112.2025.2.202.210>.
4. Алексеев, А.О.; Алексеева, Т.В. *Оксидогенез Железа в Почвах Степной Зоны*; ГЕОС: Москва, 2012. 204 с.
5. Ананьева, Н.Д.; Сусьян, Е.А.; Гавриленко, Е.Г. Особенности Определения Углерода Микробной Биомассы Почвы Методом Субстрат-Индуктированного Дыхания. *Почвоведение* **2011**, 44 (11), 1327–1333.
6. Ахмедова, З.Н.; Рамазанова, Н.И.; Гасанов, Г.Н. Фосфатазная и Уреазная Активность Почв Горных и Равнинных Ландшафтов Дагестана. *Вестник Дагестанского Научного Центра РАН* **2014**, (52), 36–39.
7. Бобкова, К.С.; Галенко, Э.П.; Тужилкина, В.В.; Осипов, А.Ф.; Кузнецов, М.А. Роль Бореальных Лесов Европейского Севера России в Регулировании Углеродного Баланса Северного Полушария. *Управленческие Аспекты Развития Северных Территорий России*; Материалы Всероссийской научной конференции, Сыктывкар, 20–23 октября 2015 г., 2015.
8. Бобровский, М.В. *Лесные Почвы Европейской России: Биотические и Антропогенные Факторы Формирования*; КМК: Москва, 2010. 359 с.
9. Борисов, А.В. Археологическое Почвоведение. *Междисциплинарная Интеграция в Археологии: По Материалам Лекций для Аспирантов и Молодых Сотрудников*; Институт археологии РАН: Москва, 2016; с. 164–181.
10. Борисов, А.В.; Демкина, Т.С.; Ельцов, М.В.; Каширская, Н.Н.; Кузнецова, Т.В.; Хомутова, Т.Э.; Чернышева, Е.В. Информационный Потенциал Микробных Сообществ Почв Археологических Памятников. *Микробные Сообщества в Эволюции Биосферы с Древнейших Времен до наших Дней. Сер. Геобиологические Процессы в Прошлом*; ПИН РАН: Москва, 2017; с. 169–181.
11. Борисов, А.В.; Зинчук, С.В.; Душанова, К.С.; Журбин, И.В.

Почвенно-Геохимические Подходы к Выявлению Границ Культурного Слоя на Археологических Памятниках, Разрушенных Распашкой. *Тенденции Развития Науки и Образования* **2016**, (21–2), 9–10.

12. Вахрушев, Л.А.; Карманов, В.Н.; Попов, Е.В.; Дымов, А.А. Содержание Фосфора в Почвах Памятника Археологии Энты IA. *Археология Евразийских Степей* **2025**, (4), 31–45. <https://doi.org/10.24852/2587-6112.2025.4.31.45>.

13. Гак, Е.И.; Чернышева, Е.В.; Ходжаева, А.К.; Борисов, А.В. Опыт Выявления и Систематизации Инфраструктурных Признаков Поселения Катакомбной Культуры Рыкань-3 в Лесостепном Подонье. *Российская Археология* **2014**, (4), 19–28.

14. Гольева, А.А.; Сыроватко, А.С. Палеоэкология Поселений Раннего Железного Века – Эпохи Переселения Народов в Среднем Поочье (Результаты Недавних Исследований). *Археология Подмосковья* **2022**, (18), 35–41. <https://doi.org/10.25681/IARAPP.2022.978-5-94375-367-1.35-41>.

15. Гольева, А.А.; Турова, И.В. Фосфор в Археологических Объектах: Формы, Количество, Устойчивость. *Археология Подмосковья* **2015**, (11), 155–163.

16. Дымов, А.А. *Сукцессии Почв в Бореальных Лесах Республики Коми*; Издательство ГЕОС: Москва, 2020. 336 с. <https://doi.org/10.34756/GEOS.2020.10.37828>.

17. Зах, В.А.; Еньшин, Д.Н. К Вопросу о Неолитизации в Лесостепи Западной Сибири. *СибСкрипт* **2015**, (2–6), 34–43.

18. Карманов, В.Н.; Недомолкина, Н.Г.; Мельничук, А.Ф. Современные Представления о Культурях Неолита на Северо-Востоке Европы. *Самарский Научный Вестник* **2019**, 8 (2), 159–170. <https://doi.org/10.24411/2309-4370-2019-12211>.

19. Каширская, Н.Н.; Плеханова, Л.Н.; Чернышева, Е.В.; Ельцов, М.В.; Удальцов, С.Н.; Борисов, А.В. Пространственно-Временные Особенности Фосфатазной Активности Естественных и Антропогенно-Преобразованных Почв. *Почвоведение* **2020**, (1), 89–101. <https://doi.org/10.31857/S0032180X20010098>.

20. Каширская, Н.Н.; Борисов, А.В. Фосфатазная Активность как Инструмент для Реконструкции Источников Поступления Фосфора в Культурный Слой. *Археология Подмосковья* **2018**, (14), 512–516.

21. Колесников, Р.А.; Тупахина, О.С.; Плеханова, Л.Н. Геоэкологические Исследования Культурных Слоев Поселения Эпохи Бронзы в Подзоне Северной Тайги Западной Сибири. *Геоархеология и Археологическая Минералогия* **2020**, 7, 33–36.

22. Кулакова, Е.П.; Дедов, И.Е.; Мещерякова, О.А.; Курбанов, Р.Н. Опыт

- Экспериментального Изучения Петромагнитных Индикаторов Археологических Палеокострищ на Примере Лёссов Киргизии. *Геосферные Исследования* **2021**, (1), 104–122.
23. Ковалева, Н.О.; Решетникова, Р.А.; Ковалев, И.В. Фосфор в Культурных Слоях и Почвах Урбозкосистем. *Вестник Московского Университета. Серия 17: Почвоведение* **2021**, (4), 56–66.
24. Колесников, Р.А.; Плеханова, Л.Н. Комплексные Интердисциплинарные Исследования Многослойного Поселения Ямгорт I в Западносибирском Приполярье. *Российская Археология* **2022**, (2), 47–59.
25. Коробов, Д.С.; Борисов, А.В. Новые Данные по Изучению Ресурсных Зон Древних и Средневековых Поселений в Кисловодской Котловине. *Российская Археология* **2020**, (4), 53–69.
<https://doi.org/10.31857/S086960630008885-2>.
26. Косинская, Л.Л. Поселение Ревью I. *Проблемы Археологического Изучения Северо-Востока Европы*; Материалы по археологии европейского Северо-Востока, вып. 20; ИЯЛИ Коми НЦ УрО РАН: Сыктывкар, 2018; с. 39–54.
27. Лисецкий, Ф.Н.; Буринчик, А.С.; Полетаев, А.О. Проблемы Охраны Археологического Наследия на Землях Особо Охраняемых Территорий и Объектов (на Примере Курганов в Агроландшафтах). *Куражсковские Чтения*; Материалы II Международной научно-практической конференции, Астрахань, 18–21 мая 2023 г.; Астраханский гос. ун-т им. В.Н. Татищева: Астрахань, 2023; с. 154–159.
28. Логинова, Э.С. Опыт Выделения Ранненеолитического Жилища на Поселении Энты I (Средняя Вычегда, Республика Коми). *Проблемы Археологического Изучения Северо-Востока Европы*; Материалы по археологии европейского Северо-Востока, вып. 20; ИЯЛИ Коми НЦ УрО РАН: Сыктывкар, 2018; с. 26–38.
29. Майгиер, Л.; Рахмонов, О.; Беднарек, Р. Особенности Почв Заброшенных Кладбищ Северной Польши на Песчаных Субстратах. *Почвоведение* **2014**, (6), 759–768.
<https://doi.org/10.7868/S0032180X14060082>.
30. Недомолкина, Н.Г. Геометрические Микролиты Ранненеолитического Поселения Векса III (Верхняя Сухона): Проблема Культурно-Хронологической Принадлежности. *От Балтики до Урала: Изыскания по Археологии Каменного Века*; ИЯЛИ Коми НЦ УрО РАН: Сыктывкар, 2014; с. 147–152.
31. Низамутдинов, Т.И.; Сулейманов, А.Р.; Моргун, Е.Н.; Гусев, Ан.В.; Тупахина, О.С.; Гусев, Ал.В.; Плеханов, А.В.; Тупахин, Д.С.; Абакумов, Е.В. Почвы Заполярного Археологического Памятника

“Поселение Лабытнанги 1 (Комяцкая Деревня)”: Морфологический Анализ и Химическая Характеристика. *Бюллетень Почвенного Института Имени В.В. Докучаева* **2023**, (114), 66–108. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2023-114-66-108>.

32. Потапова, А.В.; Каширская, Н.Н. Биологическая Активность Культурного Слоя Археологического Памятника Эпохи Бронзы Ксизово-1 (XXII–XXIV вв. до н.э.). *Материалы по Изучению Русских Почв* **2021**, 13 (40), 67–73.

33. Потапова, А.В.; Пинской, В.Н.; Гак, Е.И.; Каширская, Н.Н.; Борисов, А.В. Изменчивость Свойств Культурного Слоя Поселения Эпохи Бронзы Ксизово-1 в Лесостепном Подонье. *Российская Археология* **2020**, (1), 60–75. <https://doi.org/10.31857/S086960630008254-8>.

34. Пошехонова, О.Е.; Афонин, А.С.; Кисагулов, А.В.; Гимранов, Д.О.; Некрасов, А.Е.; Якимов, С.А.; Баженов, А.И. Некоторые Элементы Погребального Обряда Северных Селькупов по Данным Палеоэкологических Исследований. *Вестник Археологии, Антропологии и Этнографии* **2015**, (4), 165–174.

35. Таргульян, В.О. *Теория Педогенеза и Эволюции Почв*; ГЕОС: Москва, 2019. 295 с.

36. Плеханова, Л.Н. Вариабельность Магнитной Восприимчивости Почв в Связи с Отражением Палеоклиматических Обстановок и Влиянием Почвообразующих Пород. *Геоархеология и Археологическая Минералогия* **2019**, 6, 31–34.

37. Сулейманов, Р.Р.; Овсянников, В.В.; Колонских, А.Г.; Абакумов, Е.В.; Кунгурцев, А.Я.; Сулейманов, А.Р. Почвенно-Археологическое Исследование Средневекового Вотикеевского Комплекса в Северной Лесостепной Зоне Южного Предуралья. *Почвоведение* **2020**, (3), 279–290. <https://doi.org/10.31857/S0032180X20030089>.

38. Сверчкова, А.Э. Палеопочвенные Исследования II Курганного Могильника у с. Второе Имангулово и Палеоклиматические Реконструкции. *Археологические Памятники Оренбуржья*; Сборник научных трудов, вып. 16; Оренбургский государственный педагогический университет: Оренбург, 2022; с. 163–168.

39. Снопков, С.В. Использование Петрофизических Методов в Археологических Исследованиях. *Геоархеология и Археологическая Минералогия* **2016**, (3), 50–55.

40. Смекалова, Т.Н.; Лисецкий, Ф.Н.; Каширская, Н.Н.; Борисов, А.Н. Двойные Загоны – Новые Памятники Бронзового Века в Северо-Западном Крыму: Предварительные Результаты Геофизических, Геохимических и Микробиологических Исследований. *Stratum Plus* **2021**, (2), 109–126.

41. Смирнов, А.Л.; Добровольская, М.В.; Куприянов, Д.А.; Ханина, Л.Г.; Челобаева, Е.О.; Бобровский, М.В. Культурный Слой Городищ Железного Века и Раннего Средневековья в Истоках Волги и Западной Двины (Руна-Заборовка, Заборовка-Лихуша, Ворошилово, Археологический Комплекс Верхмарево). *Археология Евразийских Стеней* **2023**, (3), 198–223. <https://doi.org/10.24852/2587-6112.2023.3.198.223>.
42. Урусевская, И.С.; Алябина, И.О.; Шоба, С.А. *Карта Почвенно-Экологического Районирования Российской Федерации. Масштаб 1:8 000 000. Пояснительный Текст и Легенда к Карте*; МАКС Пресс: Москва, 2020. 100 с.
43. Хохлова, О.С.; Гольева, А.А.; Моргунова, Н.Л. Природно-Климатические Условия в V–III тыс. до н.э. в Оренбуржье по Данным Междисциплинарных Геоархеологических Исследований. В *Феномены Культур Раннего Бронзового Века Степной и Лесостепной Полосы Евразии: Пути Культурного Взаимодействия в V–III тыс. до н.э.*; Сборник научных статей, Оренбург, 16–19 апреля 2019 г.; Оренбургский государственный педагогический университет: Оренбург, 2019; с. 102–113.
44. Хомутова, Т.Э.; Демкина, Т.С.; Каширская, Н.Н.; Демкин, В.А. Фосфатазная Активность Современных и Погребенных Каштановых Почв Волго-Донского Междуречья. *Почвоведение* **2012**, (4), 478–483.
45. Фассбиндер, Й.В.Е. Магнитометрия в Археологии – от Теории к Практике. *Российская Археология* **2019**, (3), 75–91. <https://doi.org/10.31857/S086960630005672-8>.
46. Чернышева, Е.В.; Каширская, Н.Н.; Коробов, Д.С.; Борисов, А.В. Биологическая Активность Дерново-Карбонатных Почв и Культурных Слоев Аланских Поселений Кисловодской Котловины. *Почвоведение* **2014**, (9), 1068. <https://doi.org/10.7868/S0032180X14090020>.
47. Чечушков, И.В.; Калинин, П.И.; Якимов, А.С. Содержание Фосфора в Культурном Слое Поселения Каменный Амбар (Южное Зауралье): Предварительное Сообщение. *Геоархеология и Археологическая Минералогия* **2021**, (8), 27–30.
48. Якимов, А.С. Почвенно-Археологические Исследования в Сельскохозяйственной Зоне. *Климат и Природа* **2023**, (4), 84–95.
49. Anderson, J.P.E.; Domsch, K.H. A Physiological Method for the Quantitative Measurement of Microbial Biomass in Soils. *Soil Biology and Biochemistry* **1978**, (10), 215–221.
50. Dymov, A.A.; Grodnitskaya, I.D.; Yakovleva, E.V.; Dubrovskiy, Y.A.; Kutuyavin, I.N.; Startsev, V.V.; Milanovsky, E.Yu.; Prokushkin, A.S. Albic Podzols of Boreal Pine Forests of Russia: Soil Organic Matter,

Physicochemical and Microbiological Properties across Pyrogenic History. *Forests* **2022**, 13 (1831). <https://doi.org/10.3390/f13111831>.

51. Fassbinder, J.W.E. Seeing beneath the Farmland, Steppe and Desert Soil: Magnetic Prospecting and Soil Magnetism. *Journal of Archaeological Science* **2015**, 56, 85–95.

52. Fassbinder, J.W.E.; Stanjekt, H.; Vali, H. Occurrence of Magnetic Bacteria in Soil. *Nature* **1990**, 343 (6254), 161–163.

53. Fassbinder, J.W.E. Magnetometry for Archaeology. In *Encyclopedia of Geoarchaeology*; Springer International Publishing: Cham, 2023; pp 1–16.

54. Holliday, V.T.; Gartner, W.G. Methods of Soil P Analysis in Archaeology. *Journal of Archaeological Science* **2007**, (34), 301–333.

55. Kandeler, E.; Gerber, H. Short-Term Assay of Soil Urease Activity Using Colorimetric Determination of Ammonium. *Biology and Fertility of Soils* **1988**, 6, 68–72.

56. Saunders, W.M.H.; Williams, E.G. Observations on the Determinations of Total Organic Phosphorus in Soils. **1955**, 254–267.

57. Startsev, V.V.; Yakovleva, E.V.; Kutyavin, I.N.; Dymov, A.A. Fire Impact on Carbon Pools and Basic Properties of Retisols in Native Spruce Forests of the European North and Central Siberia of Russia. *Forests* **2022**, 13 (7), 1135. <https://doi.org/10.3390/f13071135>.

REFERENCES

1. *Atlas of Soils of the Komi Republic*; Zaboeva, I.V.; Taskaeva, A.I.; Dobrovol'skii, G.V.; El'kina, G.Ya.; Kaverin, D.A.; Lodygin, E.D.; Oberman, N.G.; Lapteva, E.M.; Rusanova, G.V.; Nikitin, E.D.; Archegova, I.B.; Zhangurov, E.V.; Panyukov, A.N.; Pvshtukhov, A.V.; Likhanova, I.A.; Simonov, G.A.; Mazhitova, G.G.; Vtyurin, G.M.; Kazakov, V.G.; Elsakov, V.V.; Rybin, L.N.; Mokiev, V.V.; Kondratenok, B.M.; Dobrovol'skii, G.V.; Taskaeva, A.I.; Zaboeva, I.V. (Eds.). Syktyvkar, 2010. (In Russ.)

2. Aleksandrovskaya, E.I.; Aleksandrovskii, A.L. *Anthropochemistry*; Klass-M: Moscow, 2007. (In Russ.)

3. Aleksandrovskii, A.L. Soils and the Cultural Layer of the Voznesenskoe I Settlement. *Archaeology of the Eurasian Steppes* **2025**, (2), 202–210. <https://doi.org/10.24852/2587-6112.2025.2.202.210>. (In Russ.)

4. Alekseev, A.O.; Alekseeva, T.V. *Iron Oxidogenesis in Soils of the Steppe Zone*; GEOS: Moscow, 2012. (In Russ.)

5. Anan'eva, N.D.; Sus'yan, E.A.; Gavrilenko, E.G. Specific Features of Determining the Carbon of Microbial Soil Biomass by the Substrate-Induced Respiration Method. *Pochvovedenie* **2011**, 44 (11), 1327–1333. (In Russ.)

6. Akhmedova, Z.N.; Ramazanova, N.I.; Gasanov, G.N. Phosphatase and

Urease Activity of Soils of Mountain and Plain Landscapes of Dagestan. *Herald of Dagestan Scientific Center* **2014**, (52), 36–39. (In Russ.)

7. Bobkova, K.S.; Galenko, E.P.; Tuzhilkina, V.V.; Osipov, A.F.; Kuznetsov, M.A. The Role of Boreal Forests of the European North of Russia in Regulating the Carbon Balance of the Northern Hemisphere. In *Management Aspects of the Development of Northern Territories of Russia*; Proceedings of the All-Russian Scientific Conference, Syktyvkar, 20–23 October 2015, 2015. (In Russ.)

8. Bobrovskii, M.V. *Forest Soils of European Russia: Biotic and Anthropogenic Factors of Formation*; KMK: Moscow, 2010. (In Russ.)

9. Borisov, A.V. Archaeological Soil Science. In *Interdisciplinary Integration in Archaeology: Based on Lectures for Postgraduate Students and Young Researchers*; Institute of Archaeology RAS: Moscow, 2016; pp 164–181. (In Russ.)

10. Borisov, A.V.; Demkina, T.S.; El'tsov, M.V.; Kashirskaya, N.N.; Kuznetsova, T.V.; Khomutova, T.E.; Chernysheva, E.V. Information Potential of Microbial Communities of Soils of Archaeological Monuments. In *Microbial Communities in the Evolution of the Biosphere from Ancient Times to the Present Day. Series: Geobiological Processes in the Past*; PIN RAS: Moscow, 2017; pp 169–181. (In Russ.)

11. Borisov, A.V.; Zinchuk, S.V.; Dushchanova, K.S.; Zhurbin, I.V. Soil-Geochemical Approaches to Identifying the Boundaries of the Cultural Layer at Archaeological Monuments Destroyed by Plowing. *Trends in the Development of Science and Education* **2016**, (21–2), 9–10. (In Russ.)

12. Vakhrushev, L.A.; Karmanov, V.N.; Popov, E.V.; Dymov, A.A. Phosphorus Content in Soils of the Archaeological Monument En'ty IA. *Archaeology of the Eurasian Steppes* **2025**, (4), 31–45. <https://doi.org/10.24852/2587-6112.2025.4.31.45>. (In Russ.)

13. Gak, E.I.; Chernysheva, E.V.; Khodzaeva, A.K.; Borisov, A.V. Experience in Identifying and Systematizing Infrastructural Features of the Catacomb Culture Settlement Rykan'-3 in the Forest-Steppe Don Region. *Russian Archaeology* **2014**, (4), 19–28. (In Russ.)

14. Gol'eva, A.A.; Syrovatko, A.S. Paleoeecology of Settlements of the Early Iron Age – Migration Period in the Middle Oka Region (Results of Recent Studies). *The Archaeology of the Moscow Region* **2022**, (18), 35–41. <https://doi.org/10.25681/IARAPP.2022.978-5-94375-367-1.35-41>. (In Russ.)

15. Gol'eva, A.A.; Turova, I.V. Phosphorus in Archaeological Objects: Forms, Quantity, Stability. *The Archaeology of the Moscow Region* **2015**, (11), 155–163. (In Russ.)

16. Dymov, A.A. *Soil Successions in Boreal Forests of the Komi Republic*;

- GEOS Publishing House: Moscow, 2020.
<https://doi.org/10.34756/GEOS.2020.10.37828>. (In Russ.)
17. Zakh, V.A.; En'shin, D.N. On the Neolithization in the Forest-Steppe of Western Siberia. *SibScript* **2015**, (2–6), 34–43. (In Russ.)
18. Karmanov, V.N.; Nedomolkina, N.G.; Mel'nichuk, A.F. Modern Ideas about Neolithic Cultures in the North-East of Europe. *Samara Journal of Science* **2019**, 8 (2), 159–170. <https://doi.org/10.24411/2309-4370-2019-12211>. (In Russ.)
19. Kashirskaya, N.N.; Plekhanova, L.N.; Chernysheva, E.V.; El'tsov, M.V.; Udal'tsov, S.N.; Borisov, A.V. Spatial-Temporal Features of Phosphatase Activity of Natural and Anthropogenically Transformed Soils. *Pochvovedenie* **2020**, (1), 89–101. <https://doi.org/10.31857/S0032180X20010098>. (In Russ.)
20. Kashirskaya, N.N.; Borisov, A.V. Phosphatase Activity as a Tool for Reconstructing the Sources of Phosphorus Input into the Cultural Layer. *The Archaeology of the Moscow Region* **2018**, (14), 512–516. (In Russ.)
21. Kolesnikov, R.A.; Tupakhina, O.S.; Plekhanova, L.N. Geoecological Studies of Cultural Layers of a Bronze Age Settlement in the Northern Taiga Subzone of Western Siberia. *Geoarkheologiya i Arkheologicheskaya Mineralogiya* **2020**, 7, 33–36. (In Russ.)
22. Kulakova, E.P.; Dedov, I.E.; Meshcheryakova, O.A.; Kurbanov, R.N. Experience in the Experimental Study of Petromagnetic Indicators of Archaeological Paleo-Hearths on the Example of Loesses of Kyrgyzstan. *Geosphere Research* **2021**, (1), 104–122. (In Russ.)
23. Kovaleva, N.O.; Reshetnikova, R.A.; Kovalev, I.V. Phosphorus in Cultural Layers and Soils of Urban Ecosystems. *Moscow University Soil Science Bulletin* **2021**, (4), 56–66. (In Russ.)
24. Kolesnikov, R.A.; Plekhanova, L.N. Complex Interdisciplinary Studies of the Multilayer Settlement Yamgort I in the West Siberian Subpolar Region. *Russian Archaeology* **2022**, (2), 47–59. (In Russ.)
25. Korobov, D.S.; Borisov, A.V. New Data on the Study of Resource Zones of Ancient and Medieval Settlements in the Kislovodsk Basin. *Russian Archaeology* **2020**, (4), 53–69. <https://doi.org/10.31857/S086960630008885-2>. (In Russ.)
26. Kosinskaya, L.L. The Rev'yū I Settlement. In *Problems of Archaeological Study of the North-East of Europe*; Materials on the Archaeology of the European North-East, Issue 20; IYaLI Komi NTs UrO RAN: Syktyvkar, 2018; pp 39–54. (In Russ.)
27. Lisetskii, F.N.; Burinchik, A.S.; Poletaev, A.O. Problems of Protecting Archaeological Heritage on Lands of Specially Protected Territories and Objects (on the Example of Burial Mounds in Agricultural Landscapes). In *Kurazhskovskie Chteniya*; Proceedings of the II International Scientific and

Practical Conference, Astrakhan, 18–21 May 2023; Astrakhan State University: Astrakhan, 2023; pp 154–159. (In Russ.)

28. Loginova, E.S. Experience in Identifying an Early Neolithic Dwelling at the En'ty I Settlement (Middle Vychegda, Komi Republic). In *Problems of Archaeological Study of the North-East of Europe*; Materials on the Archaeology of the European North-East, Issue 20; IYaLI Komi NTs UrO RAN: Syktyvkar, 2018; pp 26–38. (In Russ.)

29. Maigier, L.; Rakhmonov, O.; Bednarek, R. Specific Features of Soils of Abandoned Cemeteries in Northern Poland on Sandy Substrates. *Pochvovedenie* **2014**, (6), 759–768. <https://doi.org/10.7868/S0032180X14060082>. (In Russ.)

30. Nedomolkina, N.G. Geometric Microliths of the Early Neolithic Settlement Veksa III (Upper Sukhona): The Problem of Cultural and Chronological Attribution. In *From the Baltic to the Urals: Studies on the Archaeology of the Stone Age*; IYaLI Komi NTs UrO RAN: Syktyvkar, 2014; pp 147–152. (In Russ.)

31. Nizamutdinov, T.I.; Suleimanov, A.R.; Morgun, E.N.; Gusev, An.V.; Tupakhina, O.S.; Gusev, Al.V.; Plekhanov, A.V.; Tupakhin, D.S.; Abakumov, E.V. Soils of the Polar Archaeological Monument “Settlement Labytnangi 1 (Komyatskaya Derevnnya)”: Morphological Analysis and Chemical Characterization. *Dokuchaev Soil Bulletin* **2023**, (114), 66–108. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2023-114-66-108>. (In Russ.)

32. Potapova, A.V.; Kashirskaya, N.N. Biological Activity of the Cultural Layer of the Bronze Age Archaeological Monument Ksizovo-1 (22nd–24th Centuries BC). *Materials on the Study of Russian Soils* **2021**, 13 (40), 67–73. (In Russ.)

33. Potapova, A.V.; Pinskiy, V.N.; Gak, E.I.; Kashirskaya, N.N.; Borisov, A.V. Variability of Properties of the Cultural Layer of the Bronze Age Settlement Ksizovo-1 in the Forest-Steppe Don Region. *Russian Archaeology* **2020**, (1), 60–75. <https://doi.org/10.31857/S086960630008254-8>. (In Russ.)

34. Poshekhonova, O.E.; Afonin, A.S.; Kisagulov, A.V.; Gimranov, D.O.; Nekrasov, A.E.; Yakimov, S.A.; Bazhenov, A.I. Some Elements of the Burial Rite of the Northern Selkups According to Paleoecological Studies. *Bulletin of Archaeology, Anthropology, and Ethnography* **2015**, (4), 165–174. (In Russ.)

35. Targul'yan, V.O. *Theory of Pedogenesis and Soil Evolution*; GEOS: Moscow, 2019. (In Russ.)

36. Plekhanova, L.N. Variability of Magnetic Susceptibility of Soils in Connection with the Reflection of Paleoclimatic Settings and the Influence of Soil-Forming Rocks. *Geoarchaeology and Archaeological Mineralogy* **2019**, (6), 31–34. (In Russ.)

37. Suleimanov, R.R.; Ovsyannikov, V.V.; Kolonskikh, A.G.; Abakumov, E.V.; Kungurtsev, A.Ya.; Suleimanov, A.R. Soil-Archaeological Study of the Medieval Votikeevo Complex in the Northern Forest-Steppe Zone of the Southern Cis-Urals. *Pochvovedenie* **2020**, (3), 279–290. <https://doi.org/10.31857/S0032180X20030089>. (In Russ.)
38. Sverchkova, A.E. Paleosol Studies of the II Burial Mound near the Village of Vtoroe Imangulovo and Paleoclimatic Reconstructions. In *Archaeological Monuments of the Orenburg Region*; Collection of Scientific Papers, Issue 16; Orenburg State Pedagogical University: Orenburg, 2022; pp 163–168. (In Russ.)
39. Snopkov, S.V. The Use of Petrophysical Methods in Archaeological Research. *Geoarchaeology and Archaeological Mineralogy* **2016**, (3), 50–55. (In Russ.)
40. Smekalova, T.N.; Lisetskii, F.N.; Kashirskaya, N.N.; Borisov, A.N. Double Enclosures – New Bronze Age Monuments in North-Western Crimea: Preliminary Results of Geophysical, Geochemical and Microbiological Studies. *Stratum Plus* **2021**, (2), 109–126. (In Russ.)
41. Smirnov, A.L.; Dobrovol'skaya, M.V.; Kupriyanov, D.A.; Khanina, L.G.; Chelogaeva, E.O.; Bobrovskii, M.V. The Cultural Layer of Iron Age and Early Medieval Hillforts in the Sources of the Volga and Western Dvina Rivers (Runa-Zaborovka, Zaborovka-Likhusa, Voroshilovo, Verhmarevo Archaeological Complex). *Archaeology of the Eurasian Steppes* **2023**, (3), 198–223. <https://doi.org/10.24852/2587-6112.2023.3.198.223>. (In Russ.)
42. Urusevskaya, I.S.; Alyabina, I.O.; Shoba, S.A. *Map of Soil-Ecological Zoning of the Russian Federation. Scale 1:8 000 000. Explanatory Text and Legend to the Map*; MAKS Press: Moscow, 2020. (In Russ.)
43. Khokhlova, O.S.; Gol'eva, A.A.; Morgunova, N.L. Natural-Climatic Conditions in the 5th–3rd Millennium BC in the Orenburg Region According to Interdisciplinary Geoarchaeological Studies. In *Phenomena of Early Bronze Age Cultures of the Steppe and Forest-Steppe Belt of Eurasia: Ways of Cultural Interaction in the 5th–3rd Millennium BC*; Collection of Scientific Articles, Orenburg, 16–19 April 2019; Orenburg State Pedagogical University: Orenburg, 2019; pp 102–113. (In Russ.)
44. Khomutova, T.E.; Demkina, T.S.; Kashirskaya, N.N.; Demkin, V.A. Phosphatase Activity of Modern and Buried Chestnut Soils of the Volga-Don Interfluvium. *Pochvovedenie* **2012**, (4), 478–483. (In Russ.)
45. Fassbinder, J.W.E. Magnetometry in Archaeology – from Theory to Practice. *Russian Archaeology* **2019**, (3), 75–91. <https://doi.org/10.31857/S086960630005672-8>. (In Russ.)
46. Chernysheva, E.V.; Kashirskaya, N.N.; Korobov, D.S.; Borisov, A.V. Biological Activity of Rendzina Soils and Cultural Layers of Alanian

Settlements of the Kislovodsk Basin. *Pochvovedenie* **2014**, (9), 1068. <https://doi.org/10.7868/S0032180X14090020>. (In Russ.)

47. Chechushkov, I.V.; Kalinin, P.I.; Yakimov, A.S. Phosphorus Content in the Cultural Layer of the Kamennyi Ambar Settlement (Southern Trans-Urals): Preliminary Report. *Geoarchaeology and Archaeological Mineralogy* **2021**, 8, 27–30. (In Russ.)

48. Yakimov, A.S. Soil-Archaeological Studies in the Agricultural Zone. *Climate and Nature* **2023**, (4), 84–95. (In Russ.)

49. Anderson, J.P.E.; Domsch, K.H. A Physiological Method for the Quantitative Measurement of Microbial Biomass in Soils. *Soil Biology and Biochemistry* **1978**, (10), 215–221.

50. Dymov, A.A.; Grodnitskaya, I.D.; Yakovleva, E.V.; Dubrovskiy, Y.A.; Kutyavin, I.N.; Startsev, V.V.; Milanovsky, E.Yu.; Prokushkin, A.S. Albic Podzols of Boreal Pine Forests of Russia: Soil Organic Matter, Physicochemical and Microbiological Properties across Pyrogenic History. *Forests* **2022**, 13 (1831). <https://doi.org/10.3390/f13111831>.

51. Fassbinder, J.W.E. Seeing beneath the Farmland, Steppe and Desert Soil: Magnetic Prospecting and Soil Magnetism. *Journal of Archaeological Science* **2015**, 56, 85–95.

52. Fassbinder, J.W.E.; Stanjekt, H.; Vali, H. Occurrence of Magnetic Bacteria in Soil. *Nature* **1990**, 343 (6254), 161–163.

53. Fassbinder, J.W.E. Magnetometry for Archaeology. In *Encyclopedia of Geoarchaeology*; Springer International Publishing: Cham, 2023; pp 1–16.

54. Holliday, V.T.; Gartner, W.G. Methods of Soil P Analysis in Archaeology. *Journal of Archaeological Science* **2007**, (34), 301–333.

55. Kandeler, E.; Gerber, H. Short-Term Assay of Soil Urease Activity Using Colorimetric Determination of Ammonium. *Biology and Fertility of Soils* **1988**, 6, 68–72.

56. Saunders, W.M.H.; Williams, E.G. Observations on the Determinations of Total Organic Phosphorus in Soils. **1955**, 254–267.

57. Startsev, V.V.; Yakovleva, E.V.; Kutyavin, I.N.; Dymov, A.A. Fire Impact on Carbon Pools and Basic Properties of Retisols in Native Spruce Forests of the European North and Central Siberia of Russia. *Forests* **2022**, 13 (7), 1135. <https://doi.org/10.3390/f13071135>.

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2026-129-170-190



Ссылки для цитирования:

Федотова А.В., Тимофеев Е.П. Изменение свойств почв при различных формах и степени проявления опустынивания // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2026. Вып. 129. С. 170-190. DOI: 10.19047/0136-1694-2026-129-170-190

Cite this article as:

Fedotova A.V., Timofeev E.P., Changing the properties of soils in various forms and degree of manifestation of desertification, Dokuchaev Soil Bulletin, 2026, V. 129, pp. 170-190, DOI: 10.19047/0136-1694-2026-129-170-190

Благодарность.

Исследование выполнено в рамках Госзадания № 126022718174–7 “Разработать унифицированную систему индикаторов деградации сельскохозяйственных земель для засушливых регионов Российской Федерации” (FNFE-2026-0004).

Вклад авторов. Авторы настоящего исследования принимали непосредственное участие в планировании, выполнении и анализе данного исследования, ознакомились и одобрили представленный окончательный вариант.

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

Заявление об использовании технологий искусственного интеллекта. При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовались.

Заявление о доступности данных.

Все данные, полученные в ходе этого исследования, включены в опубликованную статью.

Acknowledgments.

This study was carried out within the framework of the State Assignment No. 126022718174–7 “Development of a unified system of indicators for the degradation of agricultural land in the arid regions of the Russian Federation” (FNFE–2026–0004).

Authors’ contributions. The authors were directly involved in the planning, execution, and analysis of the study, and have read and approved the final submitted version.

Conflicts of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Statement on the use of artificial intelligence technologies.

No generative artificial intelligence technologies were used in the creation of this article.

Data availability.

All data obtained during this study are included in the published article.

Изменение свойств почв при различных формах и степени проявления опустынивания

© 2026 г. А. В. Федотова*, Е. П. Тимофеев**

*ФГБНУ “Федеральный научный центр агроэкологии,
комплексных мелиораций и защитного лесоразведения
Российской академии наук” (ФНЦ агроэкологии РАН), Россия,
400062, г. Волгоград, пр. Университетский, д.97,*

**<https://orcid.org/0000-0003-0241-1797>, e-mail: fedotova-a@vfanc.ru,*

***<https://orcid.org/0009-0000-6779-4894>.*

*Поступила в редакцию 21.04.2026, после доработки 23.04.2026,
принята к публикации 21.08.2026*

Резюме: Изучено изменение почвенных свойств при различных формах и степени опустынивания на севере Прикаспийской низменности на основе применения дисперсионного анализа, LSD-теста и многофакторной линейной регрессии на севере Прикаспийской низменности. Объектами явились опустыненные почвы пяти районов Астраханской области с формами деградации в виде пастбищной дигрессии, засоления, потери биоразнообразия, а также ползузакрепленные и открытые пески. Результаты показали, что между почвами различных форм и степени проявления опустынивания наблюдались в той или иной степени различия в почвенных свойствах. При разных формах опустынивания в большей степени подвержены изменению при разных формах опустынивания влажность почв, величина рН, содержание органического вещества и гранулометрический состав. По мере нарастания степени опустынивания сокращается доля тонкодисперсных фракций (до 4%), уменьшается содержание органического вещества, увеличивается величина рН. Почвы слабопроницаемы и испытывают дефицит почвенной влаги. При возрастании степени засоления увеличивается доля глинистых частиц (< 0.002 мм). Отмечена высокая плотность почвы при опустынивании (более $1.5 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$). Многофакторная линейная регрессия показала, что наиболее чувствительными почвенными факторами, реагирующими на степень опустынивания, являются влажность почвы и величина рН. Эти

характеристики могут использоваться в качестве индикаторов степени опустынивания почвы для засушливой зоны в совокупности с видовым разнообразием растительных сообществ.

Ключевые слова: деградация почв; засоление; Прикаспийская низменность; почвенные свойства.

Changing the properties of soils in various forms and degree of manifestation of desertification

© 2026 A. V. Fedotova*, E. P. Timofeev**

¹*Federal State Budgetary Scientific Institution “Federal Scientific Center for Agroecology, Integrated Land Reclamation and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences” (Federal Research Center for Agroecology of the Russian Academy of Sciences),*

97 Universitetskii ave., Volgograd, 400062, Russian Federation,
^{*}<https://orcid.org/0000-0003-0241-1797>, e-mail: fedotova-a@vfanc.ru,
^{**}<https://orcid.org/0009-0000-6779-4894>.

Received 21.04.2026, Revised 23.04.2026, Accepted 21.08.2026

Abstract: This study considers the changes in soil properties under various forms and degree of desertification using dispersion analysis, LSD test and multifactorial linear regression in the north of the Caspian lowland. The study focused on desertified soils across five districts of the Astrakhan region—exhibiting degradation in the form of pasture regression, salinization, and biodiversity loss—as well as semi-stabilized and open sands. The results revealed varying degrees of difference in soil properties depending on the form and severity of desertification. Soil moisture, pH levels, organic matter content, and particle-size distribution were the properties most susceptible to alteration under the different forms of desertification. As the degree of desertification increases, the proportion of fine-grained fractions decreases (to 4%), organic matter content declines, and pH values rise. The soils show low water permeability and a deficit of soil moisture. An increase in the degree of salinization is accompanied by a rise in the proportion of clay particles (< 0.002 mm). High soil bulk density (exceeding 1.5 g·cm⁻³) is observed in deserted areas. Multivariate linear regression analysis demonstrated that soil moisture and pH are the soil factors most sensitive to the degree of desertification. These characteristics, in conjunction with the species diversity of plant communities, can serve as indicators of the degree of soil desertification in arid zones.

Keywords: soil degradation; salinization; Caspian lowland; soil properties.

ВВЕДЕНИЕ

Опустынивание и засоление почв являются экологическими проблемами, наблюдаемыми во всем мире (Национальный доклад, 2019; Национальный доклад, 2021; Xunming et al., 2021). Масштабы этого явления серьезны: более 70% поверхности суши затронуто опустыниванием, общая площадь засоленных почв в мире составляет около 950 млн га. Согласно Конвенции ООН (КБО ООН), опустынивание есть “деградация земель в засушливых, полузасушливых и сухих субгумидных районах (засушливые земли), возникающая в результате различных факторов, включая изменение климата и деятельность человека” (Holtz, 2003). Это приводит к значительному снижению продуктивности земель и возникновению пустынных ландшафтов (Vecerril-Piña, Mastachi-Loza, 2021; Кулик, 2023; Беляев и др., 2025).

Причинами опустынивания является комплекс факторов: глобальное потепление, изменение количества и режима атмосферных осадков, антропогенная деятельность (чрезмерный выпас скота, быстрый рост населения; бедность, чрезмерное земледелие, отсутствие альтернативных средств существования) (Valentina-Daniela, Diana-Mura, 2023).

Для засушливых районов Прикаспийской низменности характерно также засоление почв. Взаимосвязь между опустыниванием почв, засолением и почвенными свойствами трудно исследовать в большом пространственно-временном масштабе с помощью традиционных наземных методов (Liu et al., 2024). Поэтому подобные изыскания локальны.

Функционирование экосистем Прикаспийской низменности определяется во многом гидрологическим режимом Каспия. Здесь веками устанавливалось хрупкое равновесие между звеньями экосистем, а формирование почвенного покрова происходило в условиях аридного климата в зависимости от трансгрессий Каспия и гидрологического режима реки Волга на фоне засоления почв и почвообразующих пород. Изменения климата и антропогенная нагрузка привели к интенсивному развитию опустынивания, формируя зоны разных форм опустынивания (different forms of desertification – DFD). Река Волга обеспечивает наибольший сток в

Каспий и образует дельту с большим количеством внутренних водоемов, малых рек и замкнутых озер. Площадь водоемов начала сокращаться с пятидесятих годов прошлого века из-за резкого падения уровня Каспия и антропогенного вмешательства в виде регулирования стока реки Волги и обваловки территории для мелиоративных целей. Дополнительными причинами стали ненадлежащие методы ведения сельского хозяйства и добыча нефти и газа. Это вызвало разрушение природной среды, увеличение опустыненных площадей и пыльных бурь (Hu et al., 2020; Yunjie et al., 2022).

Степень опустынивания и содержание солей в почве влияет на разнообразие растений и плодородие почв (Lan et al., 2023). Сравнительные исследования почв разных форм опустынивания практически отсутствуют (Prince, Podwojewski, 2019). До настоящего времени были проведены исследования растительности (Рахманова, 2022; Сафронова, 2024) и почвы в разных районах Прикаспия (Федотова др., 2023), но большинство из них концентрировалось на единичных изменениях свойств почвы или разнообразия растений в процессе опустынивания, а исследований взаимосвязей между почвенной средой и степенью и формами опустынивания почти нет. Большинство исследований сосредоточено на причинах, масштабах и управлении опустыниванием.

Понимая, что затрагиваем дискуссионный вопрос, будем придерживаться мнения, что первичным звеном экосистемы является почва. И изменения почвенных свойств приводят к перестройке и деградации экосистемы. Для предотвращения негативных процессов очень важно получение актуальной информации о состоянии почвы с учетом определенных почвенных параметров. Показатели качества почвы используются, чтобы оценить, насколько хорошо почва выполняет свою биосферную функцию, которую невозможно измерить напрямую. В данной работе термин “качество почвы” используется для понимания последствий опустынивания, природных воздействий, землепользования, деятельности человека и управления сельским хозяйством, которые могут влиять на пространственные различия в состоянии земельных угодий. На сегодняшний день не существует единых стандар-

тов качества почв как в России, так и в странах Европейского сообщества.

Существует немало исследований оценки чувствительности к опустыниванию с использованием показателя качества почвы (Salvati, Bajocco, 2011; Egidi, 2021). Качество почвы обладает высокой стабильностью и первоначально ограничивает опустынивание до нарушения биосферных функций почвы (Shao, 2023).

Наше исследование определенно будет иметь значение для борьбы с опустыниванием, и оно актуально.

Измерение большинства индикаторов опустынивания для почв может оказаться сложным процессом (Kosmas et al., 2003; Hosseini, 2014). Наиболее важными для выполнения почвой своих функций являются показатели физического состояния почвы. В данной статье будут определены и проанализированы несколько важных показателей физического состояния почвы, которые коррелируют с воздействием на окружающую среду и которые можно количественно измерить: плотность почвы, влажность почвы и запас влаги, водопроницаемость, гранулометрический состав, а также содержание органического вещества, количество солей и величина pH.

Целью нашей работы было изучить закономерности изменения состояния почвы при различных DFD.

Задачи состояли в том, чтобы изучить следующее:

- 1) характеристики вариаций разнообразия форм и степеней опустынивания на севере Прикаспийской низменности;
- 2) характеристики вариаций почвенных факторов при DFD;
- 3) связь степени опустынивания с почвенными факторами для DFD.

Это позволит системно объяснить изменения экосистем, вызванные процессами засоления и опустынивания в Прикаспии, обеспечить важную основу для восстановления земель в условиях засоления и опустынивания, что будет иметь решающее значение для его предотвращения.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Для исследования выбраны пять районов, расположенные в северной части Прикаспийской низменности в Астраханской об-

ласти. Выбранные районы различаются по форме (DFD) и степени (degrees of desertification – DD) опустынивания почв. Почвы имеют также разную степень засоления. Территории подвержены ряду факторов, провоцирующих опустынивание почвы. Выбранные опустыненные участки разделены по следующим типам опустынивания: засоление (HD), пастбищная дигрессия (pasture digression – PD), незакрепленные открытые пески (shifting sands – SS), полукрепленные пески (semi-fixed sands – SFS), потеря биоразнообразия (loss of biodiversity – LB), и степени опустынивания (DD): 5 – “экстремальную”, 4 – “тяжелую”, 3 – “умеренную” (рис. 1, табл. 1).

1. **LB.** Водораздел. Малоинтенсивное пастбище. Почва автоморфная, бурая аридная. Средняя степень засоления почвы. DD = 3. Потеря видового разнообразия растительности. Володарский район, Астраханская область: (46,3592760348° С; 48,68913418° В).

2. **PD.** Луговой гидроморфный солончак. Средняя и сильная степень засоления почвы. Интенсивная пастбищная нагрузка. Пастбищная дегрессия. DD = 4. Икрянинский район, Астраханская область (46,030676° С; 47,735514° В).

3. **SFS.** Полукрепленные пески. Сильно изреженная растительность. Почвы незасоленные. Пастбищная нагрузка – средняя. DD = 4. Харабалинский район, Астраханская область (47,40621887° С; 47,83993012° В).

4. **SS.** Открытые пески. Растительность отсутствует. Поверхность сильно дефлирована. Почвы незасоленные. DD = 5. Наримановский район, Астраханская область (46,31613929° С, 46,85610275° В).

5. **HD.** Солончак типичный. Прибрежная зона соленого озера. Растительность представлена отдельными видами галофитов. Почва высокой степени засоления. DD = 5. Наримановский район, Астраханская область (46,24333293° С; 47,5350014146° В).

Территория, где расположены объекты исследования, имеет умеренный, резко континентальный климат с высокими средними температурами летом (21–26 °С), низкими зимой (–3–5 °С), малым количеством осадков (150–200 мм) и высокой испаряемостью (900–1000 мм/г.) (Гравшенкова и др., 2023).

В каждом районе исследований было отобрано по 5 репрезентативных участков (50×50 м), где закладывали 3 почвенных разреза, в результате получилось 25 участков и 75 почвенных разрезов. Основная информация о пробных участках представлена в таблице 1.

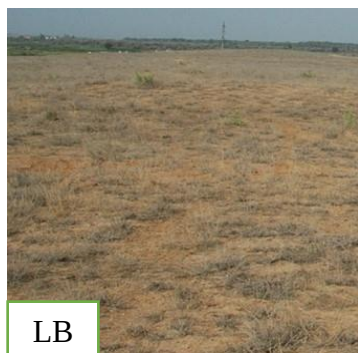


Рис. 1. Объекты исследования.
Fig. 1. Objects of research.

Таблица 1. Критерии для оценки степени опустынивания
Table 1. Criteria for assessing the degree of desertification

DFD	DD	Тип почвы (WRB-2022)	Основная растительность	Содержание солей (0–30 см), %
LB	3	Endosalic Calcisols (EC)	Camphorosma monspeliaca, Anabasis salsa	4.38
PD	4	Haplic calcisols (HC)	Eremopyrum triticeum, Artemisia herba-alba, Salsola dendroides	3.42
SFS	4	Haplic Arenosols Eutric (HAE)	Peganum harmala, Xanthium spinosum	0.13
SS	5	Arenosols (AR)	-	0.12
HD	5	Haplic Solonchaks Aridic (PSA)	Petrosimonia oppositifolia, Salicornia europaea	12.16

Отбор проб проводили в соответствии с национальным стандартом РФ ГОСТ Р 58595-2019 “Почвы. Отбор проб” (ГОСТ Р 58595-2019). Показатели органического вещества почвы (SOM), гранулометрического состава (GS), содержания солей (SOL) определяли в смешанной пробе после просеивания через сито 1 мм. Непосредственно на участке определяли водопроницаемость методом трубок с переменным напором. Для оценки почвы определяли влажность, плотность почвы и использовали коэффициент структурности ($K_{стр}$), рассчитанный по результатам сухого просеивания методом Савинова (Шеин, 2001). Гранулометрический состав определяли лазерным анализатором размера частиц ЛАСКА-ТД с предварительной пирофосфатной обработкой почвенных образцов.

Непараметрический дисперсионный анализ Краскала–Уоллиса использовался для проверки наличия каких-либо суще-

ственных различий в почвенных факторах между DFD и DD, а затем использовался пост-тест LSD.

Для выявления значимости влияния DD на факторы использовали дисперсионный анализ и модель множественной линейной регрессии. Вышеуказанный анализ и визуализация были выполнены в среде программирования R версии 4.4.1.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Физические почвенные условия в районах опустынивания оказались плохими. Различия между физическими свойствами почвы для различных DFD проявляются по-разному (табл. 2, рис. 2).

Таблица 2. Сравнение физических свойств почвы на участках с разной степенью опустынивания (0–30 см)

Table 2. Comparison of soil physical properties in areas with various degrees of desertification (0–30 cm)

DFD	W, %	ρ_b , г/см ³	Доля гранулометрических фракций, %		
			2–0.05 мм	0.05–0.002 мм	< 0.002 м
LB	6.08±0.37	1.46±0.02	39.80±4.65	24.73±2.03	35.52±5.35
PD	8.10 ± 0.92	1.49±0.04	37.00±6.06	30.93±4.27	32.27±4.09
SFS	0.75±0.04	1.71 ± 0.04	34.89±3.53	61.39±5.68	3.72±0.37
SS	4.21±0.68	1.53±0.05	36.87±3.99	60.71±5.68	2.42±0.62
HD	15.97±1.43	1.50±0.07	20.13±2.24	22.08±2.79	58.67±8.76

Примечание. W, % – влажность почвы при измерении плотности, ρ_b , г/см³ – плотность почвы.

Note. W, % – soil moisture content at the time of density measurement; ρ_b , g/cm³ – soil density.

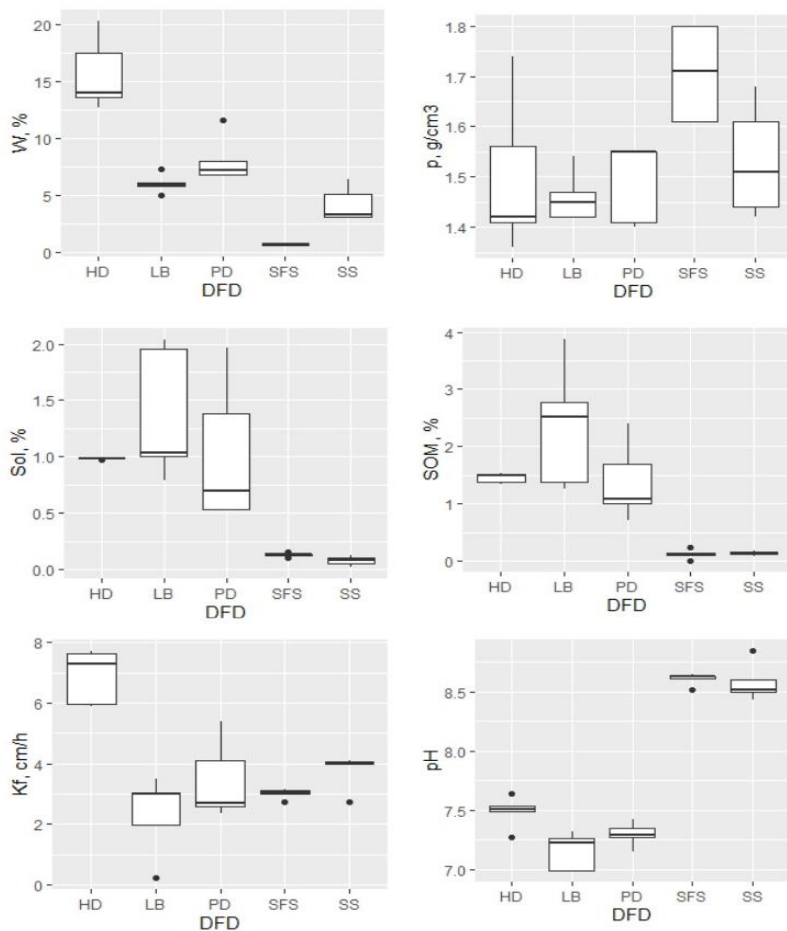


Рис. 2. Диаграммы Box & Whisker свойств почв участков исследования (W, % – влажность почвы при измерении плотности; ρ , г/см³ – плотность почвы; Sol, % – содержание солей в почве; SOM, % – содержание почвенного органического вещества; K_f – коэффициент фильтрации).

Fig. 2. Box Diagrams & Whisker of soil properties of study sites (W, % – soil moisture when measuring density; ρ , г/см³ – soil density; Sol, % – content of salts in the soil; SOM, % – content of soil organic matter; K_f – filtering factor).

Наблюдались существенные различия в гранулометрическом составе почвы. Значимой вариабельностью обладают доли фракций пыли и глины. Наибольшее количество глинистых фракций приурочено к HD ($> 50\%$). По мере прогрессирования опустынивания количество глинистых частиц (< 0.002 мм) уменьшается, по мере увеличения содержания солей в почве – увеличивается. Для SFS и SS содержание тонкодисперсных фракций мало и составляет менее 4%. Обратная тенденция отмечена для фракций пыли (0.05–0.002).

Наибольшая влажность (при измерении плотности) почвы (15.97%) характерна для HD вследствие близости водоема и большого количества солей в почве. Для остальных участков почва очень сухая и испытывает крайний дефицит почвенной влаги. Плотность почвы четырех участков с разными DFD выше нормы и находится в пределах 1.54–1.57 г/см³. Наибольшая плотность (1.71 г/см³) отмечена для SFS.

С увеличением степени опустынивания и при отсутствии солей в почве возрастают величины pH (> 8.5). Водопроницаемость почвы значимо отличается от всех исследованных почв только для HD (7 см/час). Для остальных участков величина водопроницаемости находится в пределах 2–4 см/час.

С помощью LSD-теста проведена проверка равенства средних значений имеющихся выборок и выделены среди них группы с одинаковыми средними значениями. Проведенный дисперсионный анализ и LSD-тест показали, что для разных форм опустынивания существуют значимые различия в величинах физических свойств почв (рис. 3).

Наибольшие различия зафиксированы для величин влажности исследуемых почв (4 группы), где выделена группа почв с экстремально низкой влажностью (d). Плотность почвы оказалась наиболее стабильной величиной при исследованных формах и степени опустынивания почв (2 группы). Различия по плотности наблюдаются только для почв участка с полужакрепленными песками. Большой разброс значений характерен для величин водопроницаемости почвы (5 групп, одна переходная).

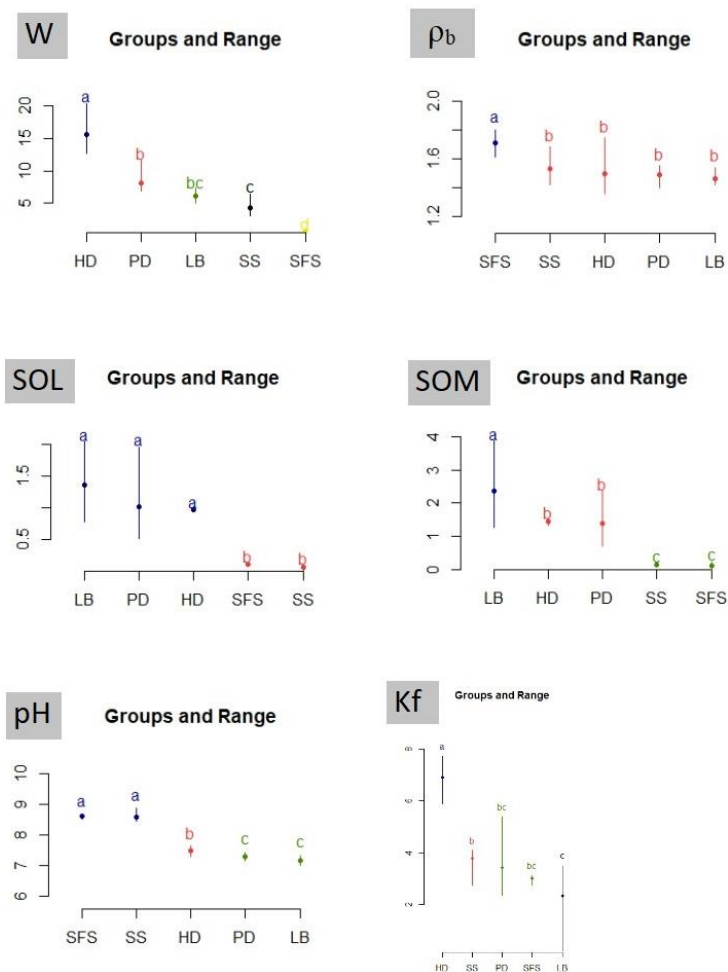


Рис. 3. Пост-тест LSD свойств почв участков исследования (W, % – влажность почвы при измерении плотности; ρ, г/см³ – плотность почвы; Sol, % – содержание солей в почве; SOM, % – содержание почвенного органического вещества; K_f – коэффициент фильтрации).

Fig. 3. Post-LSD test of soil properties of study sites (W, % – soil moisture when measuring density; ρ, g/cm³ – soil density; Sol, % – content of salts in the soil; SOM, % – content of soil organic matter; K_f – filtering factor).

Содержание почвенного органического вещества в целом мало, однако выделены 3 группы, в которых участки с $DD = 5$ (с) практически не содержат органики.

Значимость влияния почвенных свойств на степень опустынивания исследовали с применением множественной регрессии. Для получения адекватных результатов предварительно проведена проверка на мультиколлинеарность, гомоскедастичность, независимость и нормальность ошибок. Модель множественной линейной регрессии строили, учитывая выбранные физические свойства в качестве параметров и DD как целевую функцию. Получено, что при усугублении степени опустынивания значимо изменяются только влажность почвы и величина pH ($p < 0.05$).

Результаты исследования показали, что зависимость между DFD и почвенными переменными не имеет однозначного объяснения.

Появление открытых песков свидетельствует о крайней степени опустынивания ($DD = 5$). Не следует путать данные очаги опустынивания с пустыней в общем понимании. Солончаки, локализованные на побережье соленых ильменей (Астраханская область), также оцениваются $DD = 5$.

В гранулометрическом составе незасоленных почв при увеличении степени опустынивания начинают преобладать пылеватые фракции. Потеря растительного покрова приводит к изменению гранулометрического состава и увеличению пылеватых фракций, что является одним из параметров, который сопровождает изменение степени опустынивания. Наличие фракций пыли на открытых песках способствует формированию основных очагов пыльных бурь в Северном Прикаспии. Доля почвенных частиц крупного диаметра варьирует для разных DD , но не является определяющим в данных почвенно-климатических условиях. По мере углубления опустынивания значительно изменяется соотношение пылеватой и глинистой фракций. Количество глинистых частиц в почвах районов сильного опустынивания более чем в два раза меньше по сравнению с таковым в зонах потенциального опустынивания. Для сильнозасоленных почв отмечено высокое содержание тонкодисперсных фракций (более 50%), при наименьшей доле песчаных частиц (около 20%).

По запасам почвенной влаги значимо между собой различаются все участки, кроме PD и LB. Наибольшая величина характерна для HD, что связано с близкими грунтовыми водами и высоким содержанием солей.

С увеличением степени опустынивания и засоления разница в плотности почвы невелика. Но опустыненные засоленные участки (LB, PD, HD) имели меньшую плотность, чем участки с открытыми песками (SFS, SS). Участок SFS значимо отличается от всех остальных по величине плотности почвы (1.71 г/см^3). Интенсивная дефляция приводит к практически полному отсутствию поверхностного слоя, обнажая уплотненный иллювиальный горизонт. В нашем исследовании по мере увеличения степени опустынивания плотность почвы не имела явной тенденции к изменению.

Обеспеченность органическим веществом опесчаненных опустыненных почв крайне низкая. Для засоленных почв содержание органического вещества выше, что связано с наличием растительного покрова. Наибольшее значение отмечено для очень сильно засоленной почвы (HD). Это связано с особенностями формирования почвенного профиля в результате ежегодных затоплений и отложения иловых наносов с большим количеством органики. По содержанию органического вещества в почве выделяются три группы со значимыми отличиями (LB; HD и PD; SS и SFS).

Содержание органического вещества в почвах при DD = 3 находится на уровне типичных зональных значений. Луговая растительность в потенциальных зонах опустынивания (PD) способствует закреплению почвы растениями. При увеличении степени опустынивания и обеднении растительного покрова величина SOM начинает снижаться. Представленность видов растений в районах сильного опустынивания значительно ниже, чем на территориях с меньшей степенью опустынивания, или полностью отсутствует.

Водопроницаемость для почв HD значимо отличается от всех остальных форм опустынивания. Этот параметр является наименее чувствительным к проявлению опустынивания. Влияние на водопроницаемость оказывает наличие большого количества солей в почве (HD) и увеличение песчаных фракций (SFS и SS).

При этом отметим, что присутствие солей в почве не является абсолютным и однозначным признаком опустынивания.

Величина pH повышается при нарастании степени опустынивания и опесчанивания почвы. Для засоленных почв реакция среды слабощелочная. Для участков SFS и SS $\text{pH} > 8.5$, и среда щелочная. По величинам pH также выделены три группы: HD; PD и LB; SS и SFS.

Между DFD наблюдались значительные различия в величинах W, pH, SOM, SOL, ρ_b и GS, что указывает на то, что эти почвенные факторы в большей степени подвержены влиянию разных форм опустынивания.

Различное время сбора проб и выпадение осадков, могли бы быть причиной изменения влажности и плотности почвы, но на севере Прикаспийской низменности в летний сезон выпадает крайне мало осадков, поэтому измерения содержания влаги в почве, проводимые в периоды отсутствия осадков более 2 месяцев, как правило, достоверны.

Однако данные результаты не следует воспринимать однозначно. Настоящее исследование было проведено в аридной зоне, при специфических климатических условиях и жестком дефиците почвенной влаги. Вероятно, для другой климатической зоны результат был бы отличен.

ВЫВОДЫ

Установлено, что для почв разной степени опустынивания существуют различия в величинах почвенных свойств. Содержание влаги находилось в диапазоне дефицита во всех исследованных районах опустынивания, за исключением солончаков (HD).

Для разных форм опустынивания наблюдаются изменения в величинах физических свойств почв, которые характеризуются разной чувствительностью к виду и степени опустынивания.

Для диагностики опустынивания и оценки DD следует выбирать соответствующие индикаторы, наиболее чувствительные к изменениям среды. Например, W и pH существенно отреагировали на изменения DD, поэтому их можно использовать в качестве индикаторов.

Результаты могут иметь прикладное значение при разработке стратегии борьбы с опустыниванием в северном Прикаспии и являются отправной точкой для исследований по индикации, мониторингу и предотвращению опустынивания в засушливых регионах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беляев, А.И.; Пугачева, А.М.; Зыкова, А.А.; Корнеева, Е.А. Основные тренды функционирования экономики регионов России, подверженных опустыниванию. *Экономика Региона* **2025**, 21 (1), 17–32.
2. Гравшенкова, А.В.; Некозырева, М.В.; Безуглова, М.С. Климат Астраханской области в условиях современного глобального потепления. *Куражсковские Чтения* **2023**, 379–381.
3. Кулик, К.Н. 75 лет плану преобразования природы. Итоги и уроки реализации. *Научно-Агрономический Журнал* **2023**, (4), 8–15.
4. Национальный доклад “Глобальный климат и почвенный покров России: опустынивание и деградация земель, институциональные, инфраструктурные, технологические меры адаптации (сельское и лесное хозяйство)”; Эдельгериев, Р.С.-Х. (ред.); Том 2; Издательство МБА: Москва, 2019. 476 с.
5. Национальный доклад “Глобальный климат и почвенный покров России: опустынивание и деградация земель, институциональные, инфраструктурные, технологические меры адаптации (сельское и лесное хозяйство)”; Эдельгериев, Р.С.-Х. (ред.); Том 3; Издательство МБА: Москва, 2021. 700 с.
6. Рахманова, О.Я. Исследование флоры Прикаспийской пустыни в условиях изменения климата. *Изменение Климата в Регионе Каспийского Моря* **2022**, 210–211.
7. Сафронова, И.Н. Индикаторы зонального статуса Северо-Западного Прикаспия. *Степи Северной Евразии* **2024**, (X), 1182–1186.
8. Федотова, А.В.; Умарова, А.Б.; Шваров, А.П.; Яковлева, Л.В. Динамика физических свойств почв и запасов гумуса в засоленных почвах в условиях опустынивания. *Бюллетень Почвенного Института им. В.В. Докучаева* **2023**, (115), 107–128. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2023-115-107-128>.
9. Шеин, Е.В.; Архангельская, Т.А.; Гончаров, В.М.; Губер, А.К.; Початкова, Т.Н.; Сидорова, М.А.; Смагин, А.В.; Умарова, А.Б. *Полевые и Лабораторные Методы Исследования Физических Свойств и Режимов Почв: Методическое Руководство*; Изд-во МГУ: Москва, 2001. 200 с.
10. Becerril-Piña, R.; Mastachi-Loza, C.A. Desertification: Causes and

Countermeasures. In *Life on Land*; Leal Filho, W., Azul, A.M., Brandli, L., Lange Salvia, A., Wall, T., Eds.; Encyclopedia of the UN Sustainable Development Goals; Springer: Cham, 2021; pp 219–231. https://doi.org/10.1007/978-3-319-71065-5_81-1.

11. Egidi, G.; Cividino, S.; Paris, E.; Palma, A.; Salvati, L.; Cudlin, P. Assessing the Impact of Multiple Drivers of Land Sensitivity to Desertification in a Mediterranean Country. *Environ. Impact Assess. Rev.* **2021**, (89), 106594.

12. Holtz, U. United Nations Convention to Combat Desertification in Countries Severely Affected by Drought, 19 March 1998, The United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD) and Its Political Dimension. Retrieved: September **2003**.

13. Hosseini, S.S.; Ghaffarzadeh, H.R.; Abedi, Z.; Shiry, N. Assessment of Climate Change and Its Impacts on the Natural Land Use of Gorgan River Basin. *J. Nat. Environ.* **2014**, 67 (1), 25–39. <https://doi.org/10.22059/JNE.2014.50997>.

14. Hu, Y.; Han, Y.; Zhang, Y. Land Desertification and Its Influencing Factors in Kazakhstan. *J. Arid Environ.* **2020**, (180), 104203. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104203>.

15. IUSS Working Group WRB. *World Reference Base for Soil Resources. International Soil Classification System for Naming Soils and Creating Legends for Soil Maps*, 4th ed.; International Union of Soil Sciences (IUSS): Vienna, Austria, 2022.

16. Kosmas, C.; Tsara, M.; Moustaka, N.; Karaviti, C. Identification of Indicators for Desertification. *Ann. Arid Zone* **2003**, (42), 393–416.

17. Lan, M.; Xue, C.; Yang, J.; Wang, N.; Sun, C.; Wu, G.; Chen, H.; Su, Z. Changes in Plant Diversity and Soil Factors under Different Rocky Desertification Degrees in Northern Guangdong, China. *Forests* **2023**, (14), 694. <https://doi.org/10.3390/f14040694>.

18. Prince, S.D.; Podwojewski, P. Desertification: Inappropriate Images Lead to Inappropriate Actions. *Land Degrad. Dev.* **2020**, 31 (6), 677–682. <https://doi.org/10.1002/ldr.3436>.

19. Salvati, L.; Bajocco, S. Land Sensitivity to Desertification across Italy: Past, Present, and Future. *Appl. Geogr.* **2011**, 31 (1), 223–231. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2010.04.006>.

20. Shao, W.; Wang, Q.; Guan, Q.; Zhang, J.; Yang, X.; Liu, Z. Environmental Sensitivity Assessment of Land Desertification in the Hexi Corridor, China. *Catena* **2023**, (220), 106728. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106728>.

21. Valentina-Daniela, B.; Diana-Mura, B. Monitoring of Soil Desertification-Quality Parameters. In *International Conference on Reliable Systems Engineering (ICoRSE) – 2023*; Ciobotă, D.D., Ed.; Lecture Notes in

Networks and Systems; Springer: Cham, 2023; Vol. 762, pp 56–65.

22. Wang, X.; Li, X.; Cai, D.; Lou, J.; Li, D.; Liu, F. Salinification and Salt Transports under Aeolian Processes in Potential Desertification Regions of China. *Sci. Total Environ.* **2021**, (782), 146832. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146832>.

23. Yu, L.; Jiujiang, W.; Tingting, H.; Weibo, N.; Zhifeng, J.; Yuhui, G.; Xiaoyi, M. Study on the Relationship between Regional Soil Desertification and Salinization and Groundwater Based on Remote Sensing Inversion: A Case Study of the Windy Beach Area in Northern Shaanxi. *Sci. Total Environ.* **2024**, (912), 168854. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168854>.

24. Yunjie, W.E.I.; Lin, Z.; Bingzhen, D.U. The Evolution of Desertification Control and Restoration Technology in Typical Ecologically Vulnerable Regions. *J. Resour. Ecol.* **2022**, 13 (5), 775–785. <https://doi.org/10.5814/j.issn.1674-764x.2022.05.003>.

REFERENCES

1. Belyaev, A.I.; Pugacheva, A.M.; Zykova, A.A.; Korneeva, E.A. Main Trends in the Functioning of the Economy of Russian Regions Prone to Desertification. *Economy of Regions* **2025**, 21 (1), 17–32. (In Russ.)
2. Gravshenkova, A.V.; Nekozyreva, M.V.; Bezuglova, M.S. Climate of the Astrakhan Region under Conditions of Modern Global Warming. *Kurazhskovskie Chteniya* **2023**, 379–381. (In Russ.)
3. Kulik, K.N. 75 Years of the Plan for the Transformation of Nature. Results and Lessons of Implementation. *Scientific Agronomy Journal* **2023**, (4), 8–15. (In Russ.)
4. *National Report “Global Climate and Soil Cover of Russia: Desertification and Land Degradation, Institutional, Infrastructural, Technological Adaptation Measures (Agriculture and Forestry)”*; Edelgeriev, R.S.-H. (Ed.); Vol. 2; Izd-vo MBA: Moscow, 2019. (In Russ.)
5. *National Report “Global Climate and Soil Cover of Russia: Desertification and Land Degradation, Institutional, Infrastructural, Technological Adaptation Measures (Agriculture and Forestry)”*; Edelgeriev, R.S.-H. (Ed.); Vol. 3; Izd-vo MBA: Moscow, 2021. (In Russ.)
6. Rakhmanova, O.Ya. Study of the Flora of the Caspian Desert under Climate Change. *Climate Change in the Caspian Sea Region* **2022**, 210–211. (In Russ.)
7. Safronova, I.N. Indicators of the Zonal Status of the North-Western Caspian Region. *Steppes of Northern Eurasia* **2024**, (10), 1182–1186. (In Russ.)
8. Fedotova, A.V.; Umarova, A.B.; Shvarov, A.P.; Yakovleva, L.V.

Dynamics of Physical Properties of Soils and Humus Reserves in Salted Soils under Desertification. *Dokuchaev Soil Bull.* **2023**, (115), 107–128. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2023-115-107-128>. (In Russ.)

9. Shein, E.V.; Arkhangelskaya, T.A.; Goncharov, V.M.; Guber, A.K.; Pochatkova, T.N.; Sidorova, M.A.; Smagin, A.V.; Umarova, A.B. *Field and Laboratory Methods for Studying Physical Properties and Regimes of Soils: Methodological Guide*; Moscow University Press: Moscow, 2001. (In Russ.)

10. Becerril-Piña, R.; Mastachi-Loza, C.A. Desertification: Causes and Countermeasures. In *Life on Land*; Leal Filho, W., Azul, A.M., Brandli, L., Lange Salvia, A., Wall, T., Eds.; Encyclopedia of the UN Sustainable Development Goals; Springer: Cham, 2021; pp 219–231. https://doi.org/10.1007/978-3-319-71065-5_81-1.

11. Egidi, G.; Cividino, S.; Paris, E.; Palma, A.; Salvati, L.; Cudlin, P. Assessing the Impact of Multiple Drivers of Land Sensitivity to Desertification in a Mediterranean Country. *Environ. Impact Assess. Rev.* **2021**, (89), 106594.

12. Holtz, U. United Nations Convention to Combat Desertification in Countries Severely Affected by Drought, 19 March 1998, The United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD) and Its Political Dimension. Retrieved: September **2003**.

13. Hosseini, S.S.; Ghaffarzadeh, H.R.; Abedi, Z.; Shiry, N. Assessment of Climate Change and Its Impacts on the Natural Land Use of Gorgan River Basin. *J. Nat. Environ.* **2014**, 67 (1), 25–39. <https://doi.org/10.22059/JNE.2014.50997>.

14. Hu, Y.; Han, Y.; Zhang, Y. Land Desertification and Its Influencing Factors in Kazakhstan. *J. Arid Environ.* **2020**, (180), 104203. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104203>.

15. IUSS Working Group WRB. *World Reference Base for Soil Resources. International Soil Classification System for Naming Soils and Creating Legends for Soil Maps*, 4th ed.; International Union of Soil Sciences (IUSS): Vienna, Austria, 2022.

16. Kosmas, C.; Tsara, M.; Moustaka, N.; Karaviti, C. Identification of Indicators for Desertification. *Ann. Arid Zone* **2003**, (42), 393–416.

17. Lan, M.; Xue, C.; Yang, J.; Wang, N.; Sun, C.; Wu, G.; Chen, H.; Su, Z. Changes in Plant Diversity and Soil Factors under Different Rocky Desertification Degrees in Northern Guangdong, China. *Forests* **2023**, (14), 694. <https://doi.org/10.3390/f14040694>.

18. Prince, S.D.; Podwojewski, P. Desertification: Inappropriate Images Lead to Inappropriate Actions. *Land Degrad. Dev.* **2020**, 31 (6), 677–682. <https://doi.org/10.1002/ldr.3436>.

19. Salvati, L.; Bajocco, S. Land Sensitivity to Desertification across Italy: Past, Present, and Future. *Appl. Geogr.* **2011**, 31 (1), 223–231. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2010.04.006>.
20. Shao, W.; Wang, Q.; Guan, Q.; Zhang, J.; Yang, X.; Liu, Z. Environmental Sensitivity Assessment of Land Desertification in the Hexi Corridor, China. *Catena* **2023**, (220), 106728. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106728>.
21. Valentina-Daniela, B.; Diana-Mura, B. Monitoring of Soil Desertification-Quality Parameters. In *International Conference on Reliable Systems Engineering (ICoRSE) – 2023*; Cioboată, D.D., Ed.; Lecture Notes in Networks and Systems; Springer: Cham, 2023; Vol. 762, pp 56–65.
22. Wang, X.; Li, X.; Cai, D.; Lou, J.; Li, D.; Liu, F. Salinification and Salt Transports under Aeolian Processes in Potential Desertification Regions of China. *Sci. Total Environ.* **2021**, (782), 146832. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146832>.
23. Yu, L.; Jiujiang, W.; Tingting, H.; Weibo, N.; Zhifeng, J.; Yuhui, G.; Xiaoyi, M. Study on the Relationship between Regional Soil Desertification and Salinization and Groundwater Based on Remote Sensing Inversion: A Case Study of the Windy Beach Area in Northern Shaanxi. *Sci. Total Environ.* **2024**, (912), 168854. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168854>.
24. Yunjie, W.E.I.; Lin, Z.; Bingzhen, D.U. The Evolution of Desertification Control and Restoration Technology in Typical Ecologically Vulnerable Regions. *J. Resour. Ecol.* **2022**, 13 (5), 775–785. <https://doi.org/10.5814/j.issn.1674-764x.2022.05.003>.

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2026-129-191-215



Ссылки для цитирования:

Хирк А.В., Жидкин А.П. Варьирование оценок эрозии почв при использовании разных карт землепользования Тульской области // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2026. Вып. 129. С. 191-215. DOI: 10.19047/0136-1694-2026-129-191-215

Cite this article as:

Khirk A.V., Zhidkin A.P., Variation in soil erosion estimates using different land use maps in the Tula Region, Dokuchaev Soil Bulletin, 2026, V. 129, pp. 191-215, DOI: 10.19047/0136-1694-2026-129-191-215

Благодарность.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 22-17-00071-П, <https://rscf.ru/project/22-17-00071/>).

Вклад авторов. Хирк А.В. – расчетно-картографические работы, написание текста; Жидкин А.П. – концепция исследований; написание текста.

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

Заявление об использовании технологий искусственного интеллекта. При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовались

Заявление о доступности данных.

Все данные, полученные в ходе этого исследования, включены в опубликованную статью.

Acknowledgments.

The work was carried out within the support of the Russian Science Foundation (project No. 22-17-00071-П, <https://rscf.ru/project/22-17-00071/>).

Authors' contributions. Khirk A.V. – calculation and cartographic work, writing the text; Zhidkin A.P. – article concept; writing the text.

Conflicts of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Statement on the use of artificial intelligence technologies.

No generative artificial intelligence technologies were used in the creation of this article.

Data availability.

All data obtained during this study are included in the published article.

Варьирование оценок эрозии почв при использовании разных карт землепользования Тульской области

© 2026 г. А. В. Хирк*, А. П. Жидкин**

ФИЦ “Почвенный институт им. В.В. Докучаева”, Россия,

119017, Москва, Пыжевский пер, 7, стр. 2,

**<https://orcid.org/0009-0009-4819-3642>, e-mail: khirkav@my.msu.ru,*

***<https://orcid.org/0000-0003-3995-9203>.*

*Поступила в редакцию 11.11.2025, после доработки 08.12.2025,
принята к публикации 21.08.2026*

Резюме: Эрозия почв остается одной из наиболее актуальных экологических проблем в области сельского хозяйства. Развитие эрозионных моделей открывает большие возможности для оценки эрозии почв. В настоящее время недостаточное внимание уделяется картографической основе для определения площади и конфигурации границ пахотных угодий. В работе представлено сравнение темпов эрозии почв и массы смываемого вещества почв Тульской области, смоделированных на основе разных карт пахотных угодий: единой федеральной информационной системы земель сельскохозяйственного назначения (ЕФИС ЗСН), ESA World Cover 2020 (ESA WC), Global Land Cover and Land Use (GLULC). Установлено, что площадь пахотных угодий, по данным ЕФИС ЗСН, в 2–2.5 раза больше, чем по оценкам моделей землепользования ESA WC и GLULC. Карта ЕФИС ЗСН соответствует площади пашни, обрабатывавшейся в конце 1980-х годов, значительная часть которой в Тульской области в постсоветский период не обрабатывается. В связи с этим для современных оценок эрозии почв рекомендуется применение карт ESA WC и GLULC. Расхождение площадей пашни по разным картам неравномерно в разных частях Тульской области. Изменение данного показателя с северо-запада на юго-восток соответствует пространственному тренду уменьшения неоднородности почвенного покрова. По варьированию площадей пашни и связанных расчетных показателей темпов эрозии и массы ежегодно смываемой почвы можно выделить три группы районов Тульской области: I группа – северо-западные районы со светло-серыми лесными и дерново-подзолистыми почвами; II группа – центральные районы с серыми и темно-серыми почвами; III группа – юго-восточные районы с черноземами выщелоченными и оподзоленными. Максимальные отклонения от средних по районам площадей пашни, полученных по

разным картам, варьируют в I группе в диапазоне 0.64–1.51, во II группе – 0.17–0.61, в III группе – 0.09–0.20. Варьирование границ пашни на разных картах оказывает влияние на оценки эрозии почв, особенно на расчеты массы смываемой почвы. Отклонения по смоделированной массе смываемой почвы в I группе оказались в диапазоне 0.65–1.75, во II группе – 0.28–0.58, в III группе – 0.13–0.26. Данные количественные показатели следует учитывать при разработке противоэрозионных мероприятий на основе моделирования эрозии почв в Тульской области.

Ключевые слова: смыв; деградация почв; WaTEM/SEDEM; ESA World Cover 2020; Global Land Cover and Land Use.

Variation in soil erosion estimates using different land use maps in the Tula Region

© 2026 A. V. Khirk*, A. P. Zhidkin**

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

**<https://orcid.org/0009-0009-4819-3642>, e-mail: khirkav@my.msu.ru,*

***<https://orcid.org/0000-0003-3995-9203>.*

Received 11.11.2025, Revised 08.12.2025, Accepted 21.08.2026

Abstract: Soil erosion remains one of the most pressing environmental challenges, threatening agricultural productivity. The development of erosion models opens up great possibilities for assessing soil erosion. Currently, insufficient attention is paid to the cartographic basis for determining the area and configuration of the boundaries of arable land. This paper compares soil erosion in the Tula Region (Russian Federation), modeled using various cropland maps: the Unified Federal Information System of Agricultural Lands (EFISAL), ESA World Cover 2020 (ESA WC), and Global Land Cover and Land Use (GLCLU). It was found that the area of cropland according to the EFISAL data is 2–2.5 times larger than that estimated by the ESA WC and GLCLU land use models. The EFISAL map corresponds to arable land cultivated in the late 1980s, a significant share of which in the Tula Region has remained uncultivated since the post-Soviet period. Therefore, the use of ESA WC and GLCLU is recommended for modern soil erosion assessments. The discrepancy between cropland areas across different maps is uneven across the Tula Region. A trend of change in this indicator is noted from the Northwest to the Southeast, corresponding to the spatial trend of changes in the soil cover. Three groups of districts of the Tula Region can be distinguished based on variations in arable land areas, erosion rates, and the

mass of soil annually washed away: Group I – northwestern districts with Albic Retisols and Eutric Retisols; Group II – central districts with Luvic and Greyzemic Phaeozems; Group III – southeastern districts with Luvic Greyzemic Phaeozems and Luvic Chernozems. The maximum deviations from the average arable land areas for the regions obtained from different maps vary in the range of 0.64–1.51 in Group I 0.17–0.61 in Group II, and 0.09–0.20 in Group III. Variations in arable land boundaries on different maps affect soil erosion estimates, especially the calculations of the volume of soil erosion loss. Deviations in the modeled volume of soil erosion loss in Group I were in the range of 0.65–1.75, in Group II 0.28–0.58, and in Group III 0.13–0.26. These quantitative indicators should be taken into account when developing soil conservation measures based on erosion modelling in the Tula Region.

Keywords: soil loss; soil degradation; WaTEM/SEDEM; ESA World Cover 2020; Global Land Cover and Land Use.

ВВЕДЕНИЕ

Современные методы эрозионного моделирования при должной верификации и детальности входных параметров позволяют проводить оценки темпов эрозионно-аккумулятивных процессов в различных масштабах. Оценки эрозии почв, проводимые в масштабе субъектов РФ, имеют важное значение для принятия эффективных управленческих решений по сохранению окружающей среды региональными и федеральными органами государственной власти.

В последнее десятилетие проводятся многочисленные исследования по параметризации и детализации входных параметров моделирования эрозионно-аккумулятивных процессов в различных частях мира (Allewell et al., 2019). Основное внимание исследователей направлено на уточнение эрозионного потенциала осадков, эрозионного потенциала рельефа, эродированности почв, агроэрозионных индексов ценозов и других факторов. Однако недостаточное внимание уделяется изменению границ пашни.

В России проблема картографирования границ пахотных угодий является насущной, в связи с существенными изменениями площадей обрабатываемой пашни в постсоветский период (Ларионов и др., 2017). В настоящее время появляются различные глобальные и национальные карты, отражающие границы землепользования в разные периоды времени, составленные на основе раз-

ных источников. При этом различия в границах пашни по разным картографическим источникам и влияние данного параметра на оценки темпов эрозии почв слабо изучены в отечественной литературе.

Авторами ранее были проведены подобные исследования для всей пашни Белгородской области (Жидкин и др., 2024), и удалось установить относительно небольшое варьирование площади пашни и потенциальных (смоделированных) темпов эрозии почв при использовании разных карт пахотных угодий в Белгородской области. Карты единой федеральной системы земель сельскохозяйственного назначения (ЕФИС ЗСН) оказались наиболее близки к средним оценкам площадей пашни, полученным с разных карт. Однако важно отметить, что в Белгородской области в постсоветский период была заброшена относительно небольшая доля пашни – лишь 6.2%, в связи с преобладанием высокоплодородных черноземов (Ларионов и др., 2017). Представляется актуальным проведение аналогичных исследований в субъекте РФ с высокими темпами эрозии почв и большой долей убыли обрабатываемой пашни в постсоветский период.

Одним из наиболее эрозионно-опасных субъектов РФ является Тульская область. По карте 1980-х годов “Эрозионная опасность сельскохозяйственных земель Европейской части СССР” (Ларионов, Белоцерковский, 1987) средние темпы эрозии почв для всей Тульской области составляли 7.5 т/га в год. По Почвенно-эрозионной карте России 1 :5 000 000 темпы смыва в Тульской области выше и составляют 10–20 т/га год (Национальный атлас, 2011). Потенциальные темпы эрозии распаханых почв Тульской области оцениваются на чистом пару как 14.3 т/га год, а в агроценозах как 3.3 т/га год (Мальцев и др., 2019). Согласно общегосударственным оценкам (Литвин, 2017), темпы эрозии почв в Тульской области в 1980-е годы составляли 7.1 т/га в год, но к 2014 г. снизились на 7% и составили 6.6 т/га в год. Более подробный анализ оценок темпов эрозии почв в Тульской области представлен в литературном обзоре (Жидкин и др., 2023).

В Тульской области в постсоветский период произошло существенное сокращение площади сельскохозяйственных земель: за период с 1897 по 1990 гг. площадь пашни уменьшилась в сред-

нем на 7.3%, с 1990 по 2007 гг. – еще на 38% (Люри и др., 2010). Сравнительный анализ данных сельскохозяйственных переписей за 2006 и 2016 гг. и данных Росреестра Тульской области показал, что информация о площадях пашни в Росреестре завышена на 3–10%, а данные о залежах занижены в десять раз (Скобеев, 2017).

Цель данного исследования состояла в сравнительном анализе оценок темпов эрозии почв и массы ежегодно смываемой почвы со всей пашни Тульской области, получаемых на основе моделирования с использованием различных карт пахотных угодий.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Тульская область находится в северной части Среднерусской возвышенности, что обуславливает относительно высокую степень расчленения рельефа. Область находится на пологоволнистой равнине, пересеченной долинами рек, балками и оврагами. Водораздельные участки имеют высоты 240–280 м, долины рек расположены на высотах 130–160 м. Наиболее возвышенной частью Тульской области является Плавское плато. Развитие эрозионных процессов в агроландшафтах Тульской области в основном обусловлено длинными склонами до 1.5–2.0 км.

В безморозный период выпадает около 70% осадков, наибольшее их количество приходится на июль. Годовое количество осадков изменяется от 575 мм на северо-западе до 470 мм на юго-востоке.

Почвенный покров Тульской области также изменяется с северо-запада на юго-восток. В северо-западной части Тульской области преобладают светло-серые лесные и дерново-подзолистые почвы (рис. 1). В этой части области находятся районы: Заокский, Алексинский, Дубненский, Суворовский. Дерново-подзолистые почвы встречаются также в Белевском, Арсеньевском и Черском районах. В Тульском районе почвенный покров представлен в основном светло-серыми почвами. Темно-серые почвы и черноземы оподзоленные распространены в районах: Веневский, Новомосковский, Щекинский, Плавский, Черский. Выщелоченные черноземы занимают юго-восточную часть области в районах: Ефре-

мовский, Каменский, Воловский, Богородитский, Куркинский, Кимовский.

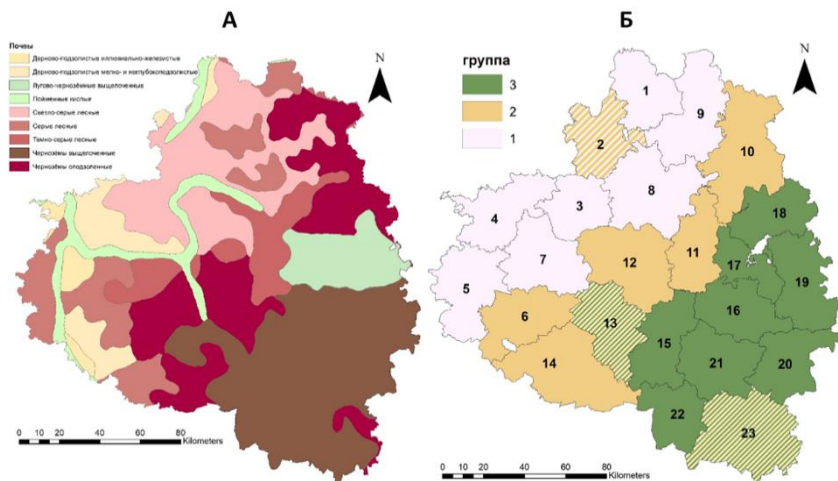


Рис. 1. А) Фрагмент Почвенной карты РСФСР 1 : 2 500 000 (под ред. Фридланда В.М., 1988). **Б)** Районы Тульской области (номера районов соответствуют таблице 1).

Fig. 1. А) Soil Map of the RSFSR 1 : 2 500 000 fragment on Tula Region (Friedland V.M. et al., 1988). **Б)** Districts of the Tula Region (district numbers correspond to table 1).

Расчеты эрозии почв были проведены в границах пахотных угодий для трех карт: единой федеральной информационной системы земель сельскохозяйственного назначения (ЕФИС ЗСН) (<http://efis.mcx.ru>) и моделей землепользования, имеющих в открытом доступе: ESA World Cover 2020 (ESA WC) (<https://worldcover2020.esa.int>) и Global Land Cover and Land Use (GLCLU) (<https://glad.umd.edu/dataset/global-land-cover-land-use-v1>). Данные картографические источники границ пашни лучше всего подходят для моделирования эрозии почв (Жидкин и др., 2024).

В модели ESA WC (Zanaga, 2021) исходными данными являются радарные съемки поверхности земли Sentinel-1 и многока-

нальные снимки Sentinel-2 с разрешением 10 м. Земной покров подразделяется на 11 классов в соответствии с классификацией продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН. Результирующая модель земного покрова актуальна на 2020 г.

Для модели GLCLU как исходные данные используются 16-дневные композиты снимков Landsat с 30-метровым разрешением (Hansen, 2021). В модели GLCLU представлено 19 классов земного покрова. Картографическая информация из моделей была преобразована в карту границ пахотных угодий на территории Тульской области в виде раstra с разрешением 30×30 м.

Эрозионный потенциал рельефа был рассчитан по цифровой модели рельефа COPERNICUS GLO-30 DEM с разрешением 30×30 м и уравнений (McCool, 1989). Эрозионный потенциал осадков (R-фактор) варьирует от 280 до 345 МДж·мм/(м²·ч·год) согласно (Panagos, 2017).

Почвозащитный потенциал растительности (С-фактор) был принят равным 0.34 по агроэрозионному индексу культур в данной зоне по Г.А. Ларионову (Ларионов, 1993), важным этапом работы стало уточнение долевого участия сельскохозяйственных культур в составе севооборота в Тульской области. Это уточнение было сделано благодаря обобщению данных Росстата о площадях, занимаемых различными культурами за 1996–2020 гг.

Эродируемость почв (К-фактор) была изучена в Мценском районе Орловской области для различных подтипов серых лесных почв, черноземов оподзоленных и выщелоченных разной степени смытости (Фомичева и др., 2024). Эродируемость почв уменьшается в следующем зональном ряду почв: дерново-подзолистые и светло-серые лесные почвы – 63 кг·ч/(МДж·мм), серые лесные – 50 кг·ч/(МДж·мм), темно-серые лесные – 45 кг·ч/(МДж·мм), черноземы оподзоленные – 38 кг·ч/(МДж·мм), черноземы выщелоченные – 36 кг·ч/(МДж·мм).

Расчет максимального по модулю отклонения от среднего проводился для следующих показателей: а) площадь пашни; б) темпы эрозии почв; в) масса ежегодно смываемой почвы, осредненных по районам. Максимальные отклонения от среднего (μ) рассчитывали по формуле:

$$\mu = \frac{|\max(X_i - \bar{X})|}{\bar{X}}, \quad (1)$$

где X_i – величина, полученная при использовании карт ЕФИС ЗСН, ESA WC, GLCLU, (га); $\bar{X}$ – среднее из трех величин, полученных при использовании карт ЕФИС ЗСН, ESA WC, GLCLU.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Площадь пашни

Площадь пашни в Тульской области по карте ЕФИС ЗСН составляет 1647 тыс. га (табл. 1), что в 1.5–2.0 раза больше, чем по картам ESA WC и GLCLU. По карте ESA WC площадь пашни составляет 1129 тыс. га; по GLCLU – всего 859 тыс. га.

Площадь пашни, по данным ЕФИС ЗСН, близка к площади распаханной пашни в 1980 г. – 1580.7 тыс. га (Литвин, 2017). При этом убыль обрабатываемой пашни в постсоветский период в Тульской области составила 47.9%, по данным Л.Ф. Литвина (Литвин, 2017), что полностью согласуется с разницей между площадью пашни по ЕФИЗ ЗСН и современными моделями землепользования, полученными на основе ДЗЗ за 2019 и 2020 гг. Таким образом, полученные результаты позволяют сделать предположение о том, что в ЕФИЗ ЗСН содержатся границы пашни, которые распахивались в 1980-е годы, но почти половина из этих земель в настоящее время не обрабатывается.

Площадь объединения данных трех карт границ пашни (ЕФИС ЗСН, ESA WC, GLCLU), составляет 1690 тыс. га. В результате карта ЕФИС ЗСН охватывает почти все площади, показанные на картах ESA WC и GLCLU в качестве пашни.

Минимальная фиксируемая площадь пашни, полученная при пересечении границ пашни трех карт, составляет 760 тыс. га. Соответственно, 88% от площади пашни на GLCLU совпадает с пашней на остальных картах. Но на ЕФИС ЗСН и ESA WC границы пашни показаны шире, чем на GLCLU. Соотношение площади пересечения к площади объединения составило лишь 0.45. К примеру, в аналогичных исследованиях в Белгородской области соотношение площади пересечения к площади объединения пашни по тем же картографическим источникам составило 0.73.

Доля площади пашни от площади районов Тульской области (распаханность земель)

По карте ЕФИС ЗСН средняя распаханность территории Тульской области составляет 64%. Пашня занимает от 45% до 85% территории районов Тульской области (табл. 1). Наименьшая доля пахотных угодий отмечена в Суворовском и Тульском районах – 45%. Наибольшая распаханность земель отмечена в Одоевском районе, где, согласно ЕФИС ЗСН, пашня занимает 85% территории. Также высокая распаханность земель (более 70% по ЕФИС ЗСН) отмечена в районах: Плавский, Тепло-Огаревский, Киреевский, Богородицкий, Воловский, Каменский, Куркинский.

По данным моделей землепользования, полученных на основе ДЗЗ, средняя распаханность территории Тульской области составляет 44% (по ESA WC) и 33% (по GLCLU), что в 1.5–2.0 раза меньше, чем по данным ЕФИС ЗСН (табл. 1).

Варьирование площадей пашни, оцененных по разным картографическим источникам

Максимальные отклонения от средних по районам площадей пашни, полученных по разным картографическим источникам, варьируют от 0.09 до 1.43 (табл. 1). Наиболее высокие значения данного показателя отмечены в северо-западной части Тульской области (рис. 2). Например, в Суворовском районе площадь пашни по данным разных карт различается в несколько раз: 49.7 тыс. га (по ЕФИС ЗСН), 8.5 тыс. га (по ESA WC) и 3.1 тыс. га (по GLCLU). Средняя площадь пашни в Суворовском районе, оцененная по трем картам, составила 20.4 тыс. га, а максимальное отклонение от средней площади пашни – 1.43.

В центральной части Тульской области максимальные отклонения от средних по районам площадей пашни, полученных по разным картографическим источникам, ниже и находятся в диапазоне 0.2–0.6. В юго-восточной части данный показатель еще ниже и составил < 0.2. Например, в Куркинском районе площадь пашни по данным ЕФИС ЗСН и ESA WC составляет 70.4 тыс. га, по GLCLU – 59.2 тыс. га; максимальные расхождения площади пашни в этом районе составили лишь 0.11.

Таблица 1. Площадь пашни и ее доля от площади районов Тульской области, оцененные по разным картографическим источникам

Table 1. The area of arable land and its share in the area of the district of the Tula region, estimated from various cartographic sources

№	Район	ЕФИС ЗСН		ESA		GLCLU		μ
		S	%	S	%	S	%	
1	Заокский	60.6	66	19.4	21	8.1	9	1.06
2	Алексинский	49.2	53	19.9	21	29.0	31	0.51
3	Дубенский	45.7	57	8.8	11	4.5	6	1.32
4	Суворовский	49.7	46	8.5	8	3.1	3	1.43
5	Белевский	62.8	53	25.4	21	13.4	11	0.85
6	Арсеньевский	62.9	59	35.9	34	24.8	23	0.53
7	Одоевский	99.4	85	48.3	41	34.0	29	0.64
8	Тульский г.о.	69.1	45	17.9	12	8.6	6	1.17
9	Ясногорский	75.6	58	26.2	20	18.3	14	0.89
10	Веневский	103.6	64	58.6	36	31.2	19	0.61
11	Киреевский	67.6	73	48.0	52	32.6	35	0.37
12	Щекинский	84.3	61	61.7	44	54.1	39	0.26
13	Плавский	73.2	71	67.3	65	53.9	52	0.17
14	Чернский	101.2	63	83.0	51	60.4	37	0.26
15	Тепло-Огаревский	76.1	75	72.5	72	59.6	59	0.14

Продолжение таблицы 1

Table 1 continued

№	Район	ЕФИС ЗСН		ESA		GLCLU		μ
		S	%	S	%	S	%	
16	Богородицкий	67.0	70	60.8	63	46.4	48	0.20
17	Узловский	36.1	59	34.6	56	26.9	44	0.17
18	Новомосковск г.о.	63.3	71	57.3	65	49.5	56	0.13
19	Кимовский	70.8	63	65.6	58	51.6	46	0.18
20	Куркинский	70.4	74	70.4	74	59.2	62	0.11
21	Воловский	79.5	74	73.9	69	63.7	59	0.12
22	Каменский	58.0	73	56.2	71	49.8	63	0.09
23	Ефремов г.о.	119.6	73	108.4	66	90.8	55	0.15
Область		1647.2	64	1129.1	44	859.2	33	0.48

Примечание. S – площадь пашни (тыс. га); % – доля площади пашни от площади районов,

μ – наибольшие отклонения от среднего.

Note. S – arable land area (thousand hectares); % – share of arable land area relative to district area;

μ – maximum deviations from the mean.

Таким образом, варьирование площади пашни, полученное на основе разных картографических источников, уменьшается с северо-запада на юго-восток Тульской области. Данная пространственная закономерность находится в соответствии с изменениями структуры почвенного покрова и косвенно подтверждает наблюдения за изменениями землепользования в последние десятилетия (Королева П.В., 2021; Rukhovich et. al., 2025), согласно которым изменения интенсивности землепользования в постсоветский период находились в тесной зависимости с убыванием плодородия почв в зональном ряду: черноземы выщелоченные, черноземы оподзоленные, темно-серые лесные, серые лесные, светло-серые лесные, дерново-слабоподзолистые, дерново-среднеподзолистые, дерново-сильноподзолистые.

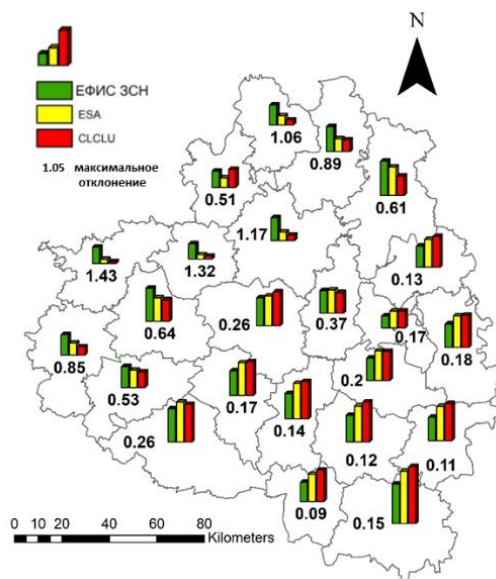


Рис. 2. Площадь пашни и максимальные отклонения площади пашни, полученные на основе разных картографических источников, в районах Тульской области.

Fig. 2. Arable land areas and maximum deviations in arable land areas, obtained from various cartographic sources, in the districts of the Tula Region.

Тульскую область можно разделить на три группы районов (рис. 1), различающихся по преобладающему типу почв и, как следствие, варьированию границ обрабатываемой пашни по разным картографическим источникам. К I группе можно отнести районы в северо-западной части области с преобладанием дерново-подзолистых и светло-серых лесных почв и высокой неопределенностью границ пашни (максимальные отклонения 0.64–1.43): Суворовский, Дубенский, Заокский, Ясногорский, Тульский, Белевский. Алексинский район также включен в I группу, однако максимальное отклонение в этом районе ниже и составляет 0.51. Ко II группе можно отнести районы в центральной части с преобладанием серых лесных почв и средней неопределенностью границ пашни (максимальные отклонения 0.26–0.61): Веневский, Киреевский, Щекинский, Чернский. Плавский район также включен во II группу, однако максимальное отклонение в этом районе ниже и составляет 0.17. К III группе можно отнести районы в юго-восточной части области с преобладанием черноземов и низкой неопределенностью границ пашни (максимальные отклонения 0.09–0.2): Каменский, Воловский, Куркинский, Богородский, Кимовский, Тепло-Огаревский. Отметим, что максимальные отклонения от средних площадей пашни, полученных по разным картам, в Тульской области существенно выше даже для III группы районов, чем в Белгородской области, где данный показатель варьировал от 0.03 до 0.10 (Жидкин и др., 2024).

Темпы эрозии почв

Средние смоделированные для Тульской области темпы эрозии почв, полученные при использовании разных карт пашни, варьируют от 3.3 до 4.0 т/га в год. Данные оценки наиболее близки к современным отечественным оценкам, представленным в работе (Мальцев и др., 2019), составившим 3.3 т/га в год. Тем не менее, данные оценки ниже, чем оценки других авторов, представленные во введении к данной статье. Верификация эрозионного моделирования проводилась на малом водосборе, расположенном в Плавской районе Тульской области (Zhidkin et al., 2023) на черноземах оподзоленных и выщелоченных, в бассейне р. Локна (Иванова и др., 2023), а также на малом водосборе и в агрохозяйстве в Мцен-

ском районе в Орловской области с преобладанием серых лесных почв (Голосов и др., 2024; Жидкин и др., 2024).

Максимальные расчетные темпы эрозии почв получены при использовании ЕФИС ЗСН, а минимальные – ESA WC (рис. 3). В среднем по районам темпы эрозии почв, смоделированные на основе карты ЕФИС ЗСН, варьируют от 1.7 до 6.6 т/га в год в разных районах Тульской области. Примерно такой же разброс значений, от 1.6 до 6.5 т/га в год в пределах пахотных угодий, получен на основе карты GLCLU. Темпы эрозии почв, рассчитанные на основе карты ESA WC, немного ниже – от 1.5 до 5.5 т/га в год.

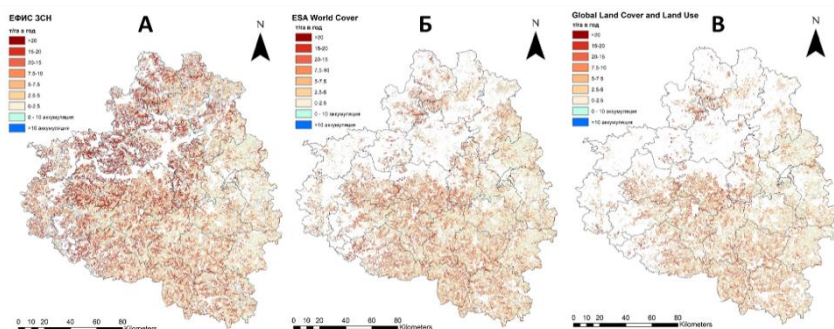


Рис. 3. Темпы эрозии в пределах пашни Тульской области: **А)** ЕФИС ЗСН; **Б)** ESA World Cover; **В)** Global Land Cover and Land Use.

Fig. 3. Erosion rates within the arable land of the Tula region: **A)** EFIS ZSN; **Б)** ESA World Cover; **В)** Global Land Cover and Land Use.

Варьирование темпов эрозии почв, оцененных по разным картографическим источникам

Рисунок 3 отчетливо демонстрирует значительные различия в расчетных темпах эрозии почв по разным картам пашни в I группе районов, расположенных в северо-западной части Тульской области; средние различия – во II группе районов в средней части области; и слабые различия – в III группе районов в южной части области.

Однако при осреднении темпов эрозии почв по районам различия проявляются менее отчетливо. Максимальные отклонения

от средних по районам темпов эрозии почв, полученных при использовании разных карт пахотных угодий, варьируют от 0.01 до 0.71 (табл. 2). Наиболее сильные различия в темпах эрозии почв, составившие от 0.26 до 0.71, выявлены в Алексинском, Белевском, Суворовском и Тульском районах, расположенных в северо-западной части области (рис. 4) в связи с сильными различиями размеров и расположения пашни в данной части Тульской области.

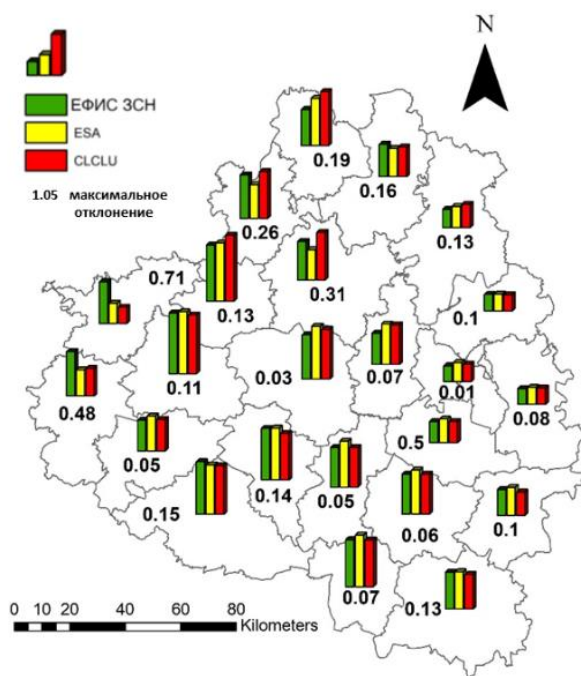


Рис. 4. Темпы эрозии и максимальные отклонения от средних по районам темпов эрозии почв, рассчитанные на основе разных картографических источников, в районах Тульской области.

Fig. 4. Erosion rates and maximum deviations from the average soil erosion rates in the districts, obtained on the basis of different cartographic sources, in the districts of the Tula Region.

Таблица 2. Темпы эрозии почв, суммарная масса смываемой с полей почвы и их варьирование, оцененные по разным картографическим источникам

Table 2. The total mass of soil washed away from fields and its variation, estimated from various cartographic sources

№	Район	ЕФИС ЗСН		ESA		GLCLU		μ	
		ТЭ	М	ТЭ	М	ТЭ	М	ТЭ	М
1	Заокский	-3.9	-233.6	-4.2	-80.9	-5.3	-42.4	0.19	0.96
2	Алексинский	-4.7	-233.6	-3.0	-60.2	-4.6	-132.0	0.26	0.65
3	Дубенский	-6.1	-277.1	-5.2	-45.4	-6.5	-29.5	0.13	1.36
4	Суворовский	-4.5	-224.7	-1.8	-15.4	-1.6	-5.0	0.71	1.75
5	Белевский	-4.8	-304.0	-2.3	-58.5	-2.7	-35.6	0.48	1.29
6	Арсеньевский	-3.3	-208.9	-3.1	-109.9	-3.1	-78.1	0.05	0.58
7	Одоевский	-6.6	-657.2	-5.5	-267.2	-5.8	-196.8	0.11	0.76
8	Тульский г.о.	-4.2	-290.7	-2.7	-47.7	-4.7	-40.2	0.31	1.30
9	Ясногорский	-3.5	-261.0	-2.5	-66.7	-2.9	-53.7	0.16	1.05
10	Веневский	-2.0	-203.8	-1.9	-110.8	-2.3	-72.6	0.13	0.58
11	Киреевский	-3.4	-228.6	-3.6	-174.1	-3.9	-126.6	0.07	0.30
12	Щекинский	-4.8	-407.0	-4.7	-287.9	-4.9	-262.6	0.03	0.28
13	Плавский	-5.6	-413.5	-4.6	-309.2	-4.6	-250.0	0.14	0.28
14	Чернский	-5.7	-581.1	-4.4	-367.9	-4.8	-288.1	0.15	0.41
15	Тепло-Огаревский	-4.3	-329.8	-4.1	-299.4	-3.9	-234.3	0.05	0.19

Продолжение таблицы 2

Table 2 continued

№	Район	ЕФИС ЗСН		ESA		GLCLU		μ	
		ТЭ	М	ТЭ	М	ТЭ	М	ТЭ	М
16	Богородицкий	-2.3	-154.2	-2.1	-130.1	-2.1	-98.1	0.05	0.23
17	Узловский	-1.7	-61.8	-1.7	-58.8	-1.7	-46.2	0.01	0.17
18	Новомосковск г.о.	-1.8	-113.6	-1.5	-85.3	-1.6	-80.1	0.10	0.22
19	Кимовский	-1.7	-120.4	-1.5	-95.7	-1.6	-81.3	0.08	0.21
20	Куркинский	-2.8	-197.6	-2.5	-178.6	-2.3	-135.9	0.10	0.20
21	Воловский	-4.3	-340.1	-3.9	-289.3	-3.9	-246.9	0.06	0.16
22	Каменский	-5.1	-294.5	-4.6	-256.5	-4.6	-231.0	0.07	0.13
23	Ефремов г.о.	-4.0	-483.4	-3.3	-363.0	-3.4	-304.8	0.13	0.26
Область		-4.4	-6620.2	-3.47	-3758.4	-4.07	-3071.9	0.10	0.48

Примечание. ТЭ – темпы эрозии (т/га в год); М – масса смываемой с полей почвы (тыс. тонн в год);

μ – наибольшие отклонения от среднего.

Note. ТЭ – erosion rates (t/ha per year); М – mass of soil washed off fields (thousand tonnes per year);

μ – maximum deviations from the mean.

Важно отметить, что варьирование средних по районам темпов эрозии почв оказалось существенно ниже, чем варьирование площадей пашни. Осредненные по районам темпы эрозии почв слабо связаны с площадью пашни; значительно более сильное влияние на темпы эрозии почв оказывает положение пашни относительно элементов рельефа. В случае забрасывания больших массивов пашни изменение средних по районам темпов эрозии почв определяется изменением эрозионного потенциала рельефа на оставшихся в обработке землях по сравнению с общим массивом ранее распахиваемых земель.

В большинстве районов темпы эрозии почвы, рассчитанные на ESA WC и GLCLU, ниже, чем на основе ЕФИС ЗСН, что связано со снижением эрозионного потенциала рельефа пашни и, вероятно, обусловлено забросом земель на крутых склонах, которые менее удобны для обработки. Однако в некоторых районах средние темпы эрозии почв слабо различаются даже при существенном сокращении площади пашни. Например, в Щекинском районе площадь пашни по ЕФИС ЗСН и GLCLU различается на треть (84.3 тыс. га и 54.0 тыс. га), а расчетные средние по району темпы эрозии почв почти одинаковые – 4.8–4.9 т/га в год. В некоторых случаях сокращение площади пашни привело к увеличению потенциальных темпов эрозии почвы, осредненных по районам. Например, в Дубенском районе площадь пашни по ЕФИС ЗСН и GLCLU различается десятикратно (45.7 тыс. га и 4.5 тыс. га), а расчетные средние по району темпы эрозии почв по ЕФИС ЗСН ниже, чем по GLCLU (6.1 т/га в год и 6.5 т/га в год).

Суммарная масса смываемой с полей почвы

Суммарная масса ежегодно смываемой с полей почвы, рассчитанная на основе разных карт пахотных угодий, значительно различается, несмотря на относительно близкие расчетные темпы эрозии почв, осредненные по районам (рис. 5). Максимальные значения данного показателя получены при использовании карты ЕФИС ЗСН и составили 6620.2 тыс. т в год, минимальные – GLCLU, в два раза меньше – 3071.9 тыс. т в год (табл. 2).

Самое большое количество ежегодно смываемой почвы отмечено в следующих районах: Одоевском, Чернском, Щекинском,

Плавском и Воловском. Средние темпы эрозии почв в этих районах варьируют от 3.9 до 6.6 тонн/га в год, однако площадь пашни относительно велика, что способствует большой массе ежегодно смываемой почвы (табл. 1, 2).

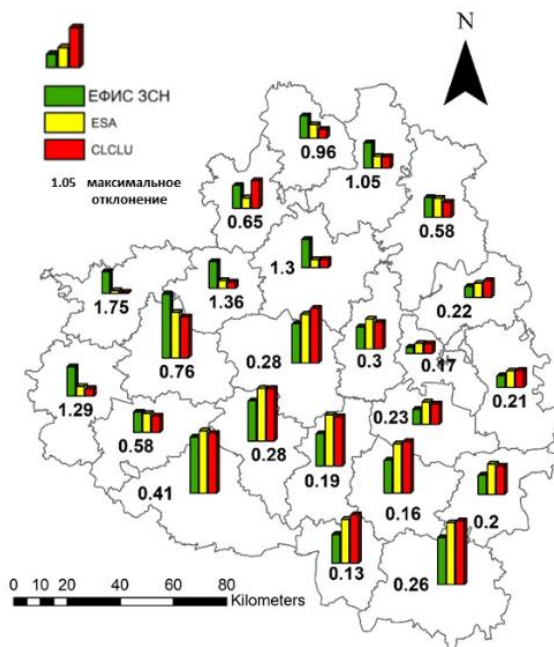


Рис. 5. Масса смываемой почвы и максимальное отклонение от средних по районам, полученные на основе разных картографических источников, в районах Тульской области.

Fig. 5. Masses of washed away soil and maximum deviations from the average in the districts, obtained based on different cartographic sources, in the districts of the Tula Region.

Варьирование массы ежегодно смываемой почвы, оцененной по разным картографическим источникам

Различия в суммарной массе ежегодно смываемой с полей почвы в значительной степени обусловлены различиями в площади пашни, поскольку данные показатели сильно связаны. В силу

этого связь между площадью пашни и массой смываемой почвы, полученная по разным картам, очень близка. Наибольшие отклонения от средней по районам суммарной массы смываемой почвы наблюдаются в северо-западной части Тульской области в районах I группы и составляют 0.65–1.75 (табл. 1). В районах II группы максимальные отклонения от средней по районам массы смываемой почвы варьируют от 0.28 до 0.58. В районах III группы данный показатель варьирует от 0.13 до 0.23. В г. о. Ефремов он несколько выше и составляет 0.26.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Площадь пахотных угодий в Тульской области, по данным ЕФИС ЗСН, больше в 2–2.5 раза, чем по оценкам моделей землепользования ESA WC и GLCLU, вероятно, в связи с тем, что в ЕФИЗ ЗСН указаны границы пашни, которая использовалась в 1980-е годы. Почти половина ее в настоящее время не обрабатывается.

По степени варьирования в площади пахотных угодий, темпов смыва и массы смываемой почвы можно выделить три группы районов Тульской области. Эти группы совпадают с распространением основных типов почв.

Первая группа – северо-западные районы (Суворовский, Дубенский, Заокский, Ясногорский, Тульский, Белевский) со светло-серыми лесными и дерново-подзолистыми почвами. В I группе максимальные отклонения от средних по районам площади пашни составили от 0.64 до 1.43; отклонения темпов эрозии почв – 0.11–0.48; отклонения массы смываемой почвы – 0.65–1.75. Пограничным по значениям варьирования показателей между I и II группами оказался Алексинский район.

Вторая группа – центральные районы (Веневский, Киреевский, Новомосковский г. о., Щекинский, Чернский) с серыми и темно-серыми почвами. Во II группе районов максимальные отклонения от средних по районам площади пашни составили 0.26–0.61; отклонения темпов эрозии – 0.03–0.15; отклонения массы смываемой почвы – 0.28–0.58. Пограничным по значениям варьирования между II и III группами оказался Плавский район и г. о. Ефремов.

Третья группа – юго-восточные районы (Каменской, Воловский, Куркинский, Богородский, Кимовский, Тепло-Огаревский) с черноземами выщелоченными и оподзоленными. В III группе максимальные отклонения от средних по районам площади пашни составили 0.09–0.20; темпов эрозии – 0.05–0.08; отклонения массы смываемой почвы – 0.13–0.26.

Смоделированные темпы эрозии почв в меньшей степени варьируют при использовании разных карт пашни, чем масса смываемой почвы, поскольку темпы эрозии почв определяются положением границ пашни относительно элементов рельефа и слабо зависят от площади пашни. В некоторых районах выявлено забрасывание земель на эрозионно-опасных участках склонов, что привело к снижению средних по районам темпов эрозии почв.

Установленные количественные показатели варьирования смоделированных оценок эрозии почв по разным картографическим источникам следует учитывать при разработке противоэрозионных мероприятий в Тульской области. Рекомендуется актуализировать границы пашни; при разработке противоэрозионных мероприятий оперировать средними темпами эрозии почв, а не массой смываемой почвы, особенно в северо-западных районах Тульской области.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жидкин, А.П.; Комиссаров, М.А.; Шамшурина, Е.Н.; Мищенко, А.В. Эрозия почв на Среднерусской возвышенности (обзор). *Почвоведение* **2023**, (2), 259–272. <https://doi.org/10.31857/S0032180X22600901>.
2. Жидкин, А.П.; Рухович, Д.И.; Мальцев, К.А.; Королева, П.В. Варьирование оценок эрозии почв при использовании разных карт пахотных угодий Белгородской области. *Почвоведение* **2024**, (4), 621–632. <https://doi.org/10.31857/S0032180X24040075>.
3. Иванова, Н.Н.; Фомичева, Д.В.; Рухович, Д.И.; Шамшурина, Е.Н. Ретроспективный анализ истории земледельческого освоения и оценка темпов эрозии почв в бассейне р. Локна, Тульская область. *Почвоведение* **2023**, (7), 872–886.
4. Королева, П.В. Пространственно-временные связи между землепользованием и почвенным покровом пахотных угодий (на примере Арсеньевского и Плавского районов Тульской области в период с 1969 по 2020 гг.). Автореф. дисс. ... к. с.-х. н., Москва, 2021.

5. Ларионов, Г.А. *Эрозия и дефляция почв*; Изд-во МГУ: Москва, 1993.
6. Литвин, Л.Ф.; Кирюхина, З.П.; Краснов, С.Ф.; Добровольская, Н.Г. География динамики земледельческой эрозии почв на европейской территории России. *Почвоведение* **2017**, (11), 1390–1400.
7. Люри, Д.И.; Горячкин, С.В.; Караваева, Н.А.; Денисенко, Е.А.; Нефедова, Т.Г. *Динамика сельскохозяйственных земель России в XX в. и постагрогенное восстановление растительности и почв*; ГЕОС: Москва, 2010.
8. Мальцев, К.А.; Ермолаев, О.П. Потенциальные эрозионные потери почвы на пахотных землях европейской части России. *Почвоведение* **2019**, (12), 1502–1512. <https://doi.org/10.1134/S0032180X19120104>.
9. *Национальный атлас почв Российской Федерации*; Астрель: Москва, 2011.
10. Скобеев, Н.М. Новейшие тенденции в изменении землепользования и специфика их учета на примере Тульской области. *Региональные исследования* **2017**, (4), 81–92.
11. Фомичева, Д.В.; Жидкин, А.П.; Комиссаров, М.А. Полимасштабные оценки варьирования эродированности почв в условиях высокой неоднородности почвенного покрова Северной лесостепи Среднерусской возвышенности. *Почвоведение* **2024**, (2), 345–358. <https://doi.org/10.31857/S0032180X24020116>.
12. Alewell, C.; Borrelli, P.; Meusburger, K.; Panagos, P. Using the USLE: Chances, Challenges and Limitations of Soil Erosion Modelling. *Int. Soil Water Conserv. Res.* **2019**, 7 (3), 203–225.
13. Hansen, M.C.; Potapov, P.V.; Pickens, A.H.; Tyukavina, A.; Hernandez-Serna, A.; Zalles, V.; Turubanova, S.; Kommareddy, I.; Stehman, S.V.; Song, X.-P. Global Land Use Extent and Dispersion within Natural Land Cover Using Landsat Data. *Environ. Res. Lett.* **2021**, 17 (3), 034050. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac46ec>.
14. McCool, D.K.; Foster, G.R.; Mutchler, C.K.; Meyer, L.D. Revised Slope Length Factor for the Universal Soil Loss Equation. *Trans. ASAE* **1989**, 32 (5), 1571–1576. <https://doi.org/10.13031/2013.31192>.
15. Rukhovich, D.I.; Koroleva, P.V.; Shapovalov, D.A.; Komissarov, M.A.; Pham, T.G. Transformation of Arable Lands in Russia over the Last Half Century – Analysis Based on Detailed Mapping and Retrospective Monitoring of Soil–Land Cover and Decipherment of Big Remote Sensing Data. *Sustainability* **2025**, 17 (14), 6203.

REFERENCES

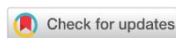
1. Zhidkin, A.P.; Komissarov, M.A.; Shamshurina, E.N.; Mishchenko, A.V. Soil Erosion on the Central Russian Upland (Review). *Pochvovedenie* **2023**, (2), 259–272. <https://doi.org/10.31857/S0032180X22600901>. (In Russ.)
2. Zhidkin, A.P.; Rukhovich, D.I.; Maltsev, K.A.; Koroleva, P.V. Variation of Soil Erosion Estimates Using Different Maps of Arable Lands in Belgorod Oblast. *Pochvovedenie* **2024**, (4), 621–632. <https://doi.org/10.31857/S0032180X24040075>. (In Russ.)
3. Ivanova, N.N.; Fomicheva, D.V.; Rukhovich, D.I.; Shamshurina, E.N. Retrospective Analysis of the History of Agricultural Development and Assessment of Soil Erosion Rates in the Lokna River Basin, Tula Oblast. *Pochvovedenie* **2023**, (7), 872–886. (In Russ.)
4. Koroleva, P.V. Spatiotemporal Relationships between Land Use and Soil Cover of Arable Lands (Case Study of Arsenyevsky and Plavsky Districts of Tula Oblast in 1969–2020). Extended Abstract of Candidate of Agricultural Sciences Thesis, Moscow, 2021. (In Russ.)
5. Larionov, G.A. *Erosion and Deflation of Soils*; Izd-vo MGU: Moscow, 1993. (In Russ.)
6. Litvin, L.F.; Kiryukhina, Z.P.; Krasnov, S.F.; Dobrovolskaya, N.G. Geography of the Dynamics of Agricultural Soil Erosion on the European Territory of Russia. *Pochvovedenie* **2017**, (11), 1390–1400. (In Russ.)
7. Lyuri, D.I.; Goryachkin, S.V.; Karavaeva, N.A.; Denisenko, E.A.; Nefedova, T.G. *Dynamics of Agricultural Lands in Russia in the 20th Century and Post-Agrogenic Restoration of Vegetation and Soils*; GEOS: Moscow, 2010. (In Russ.)
8. Maltsev, K.A.; Ermolaev, O.P. Potential Soil Erosion Losses on Arable Lands of the European Part of Russia. *Pochvovedenie* **2019**, (12), 1502–1512. <https://doi.org/10.1134/S0032180X19120104>. (In Russ.)
9. *National Atlas of Soils of the Russian Federation*; Astrel: Moscow, 2011. (In Russ.)
10. Skobeev, N.M. Recent Trends in Land Use Change and Specifics of Their Accounting: Case Study of Tula Oblast. *Regionalnye issledovaniya* **2017**, (4), 81–92. (In Russ.)
11. Fomicheva, D.V.; Zhidkin, A.P.; Komissarov, M.A. Multiscale Assessment of Soil Erodibility Variation under Conditions of High Heterogeneity of Soil Cover in the Northern Forest-Steppe of the Central Russian Upland. *Pochvovedenie* **2024**, (2), 345–358. <https://doi.org/10.31857/S0032180X24020116>. (In Russ.)

12. Alewell, C.; Borrelli, P.; Meusbürger, K.; Panagos, P. Using the USLE: Chances, Challenges and Limitations of Soil Erosion Modelling. *Int. Soil Water Conserv. Res.* **2019**, 7 (3), 203–225.
13. Hansen, M.C.; Potapov, P.V.; Pickens, A.H.; Tyukavina, A.; Hernandez-Serna, A.; Zalles, V.; Turubanova, S.; Kommareddy, I.; Stehman, S.V.; Song, X.-P. Global Land Use Extent and Dispersion within Natural Land Cover Using Landsat Data. *Environ. Res. Lett.* **2021**, 17 (3), 034050. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac46ec>.
14. McCool, D.K.; Foster, G.R.; Mutchler, C.K.; Meyer, L.D. Revised Slope Length Factor for the Universal Soil Loss Equation. *Trans. ASAE* **1989**, 32 (5), 1571–1576. <https://doi.org/10.13031/2013.31192>.
15. Rukhovich, D.I.; Koroleva, P.V.; Shapovalov, D.A.; Komissarov, M.A.; Pham, T.G. Transformation of Arable Lands in Russia over the Last Half Century – Analysis Based on Detailed Mapping and Retrospective Monitoring of Soil–Land Cover and Decipherment of Big Remote Sensing Data. *Sustainability* **2025**, 17 (14), 6203.

===== **ДИСКУССИЯ** =====

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2026-129-216-238



Ссылки для цитирования:

Савин И.Ю., Соловьев Д.А., Орлова К.С., Сапожников П.М., Романовская А.Ю. Методология оценки вклада почв в экосистемные сервисы // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2026. Вып. 129. С. 216-238. DOI: 10.19047/0136-1694-2026-129-216-238

Cite this article as:

Savin I.Yu., Soloviev D.A., Orlova K.S., Sapozhnikov P.M., Romanovskaya A.Yu., Methodology for assessing the soil contribution to ecosystem services, Dokuchaev Soil Bulletin, 2026, V. 129, pp. 216-238, DOI: 10.19047/0136-1694-2026-129-216-238

Благодарность.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 25-46-02010, <https://rscf.ru/project/25-46-02010/>.

Вклад авторов. Савин И.Ю. – концептуализация, разработка методологии исследования, руководство исследованием, написание (подготовка черновика рукописи), написание-рецензирование и редактирование рукописи. Соловьев Д.А. – концептуализация, разработка методологии исследования, написание (подготовка черновика рукописи). Орлова К.С. – визуализация, проведение исследования, формальный анализ. Сапожников П.М. – написание-рецензирование и редактирование рукописи. Романовская А.Ю. – написание-рецензирование и редактирование рукописи. Все авторы ознакомлены с окончательной версией статьи и одобрили ее.

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

Заявление об использовании технологий искусственного интеллекта. При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовались.

Заявление о доступности данных.

Данные, использованные в этом исследовании, могут быть предоставлены автором по обоснованному запросу в связи с необходимостью соблюдения конфиденциальности участников.

Acknowledgments.

The studies were carried out with the financial support of the Russian Science Foundation, project No. 25-46-02010, <https://rscf.ru/project/25-46-02010/>.

Authors' contributions. Savin I.Yu. – conceptualization, methodology, supervision, writing original draft, review & editing. Soloviev D.A. – conceptualization, methodology, writing original draft. Orlova K.S. – visualization, investigation, formal analysis. Sapozhnikov P.M. – writing, review & editing. Romanovskaya A.Yu. – writing, review & editing. All authors have reviewed and approved the final version of the article.

Conflicts of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Statement on the use of artificial intelligence technologies.

No generative artificial intelligence technologies were used in the creation of this article.

Data availability.

The data that support the findings of this study are available from the corresponding author upon reasonable request, due to the need to protect participant confidentiality.

Методология оценки вклада почв в экосистемные сервисы

© 2026 г. И. Ю. Савин^{1,2*}, Д. А. Соловьев^{1**}, К. С. Орлова^{1***},
П. М. Сапожников³, А. Ю. Романовская^{1****}

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

*<https://orcid.org/0000-0002-8739-5441>, e-mail: savin_iyu@esoil.ru,

**<https://orcid.org/0009-0004-3590-754X>

***<https://orcid.org/0000-0003-3063-0604>,

****<https://orcid.org/0000-0001-9434-3095>.

²Институт экологии РУДН, Россия,
115093, Москва, Подольское ш., 8с5.

³МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия, факультет почвоведения,
119991, Москва, Ленинские горы, 1.

Поступила в редакцию 24.02.2026, после доработки 04.04.2026,
принята к публикации 21.08.2026

Резюме: В последние десятилетия возникло и активно развивается научное направление изучения экосистемных сервисов. Почва является одним из основных компонентов экосистемы, поэтому ее

функционирование предопределяет многие ее сервисы. Однако выделение роли почвы в выраженности того или иного сервиса экосистемы из-за сложных и порой малоизученных взаимосвязей всех ее компонентов является нерешенной задачей. В статье представлено описание нового методического подхода к оценке сервисов почв, основанного на сопоставлении свойств почв со свойствами материнской породы. Приведена демонстрация этого подхода на примере оценки одного из сервисов почв: почвы как депозитария воды. Установлено, что почвообразование может приводить не только к усилению выраженности сервисов почв, но и к ее уменьшению, что может быть интерпретировано как антисервисы почв. Анализ в качестве примера выраженности сервиса почв по удержанию воды на территории России показал, что в России почти на половине ее территории отмечается отсутствие рассматриваемого сервиса почв, на трети территории этот сервис выражен хорошо, и на почти 20% территории выражен антисервис. Согласно полученным данным в 12 субъектах РФ оценочная стоимость рассматриваемого сервиса почв превышает 100 миллиардов рублей, а предоставление данного сервиса всеми почвами в стране оценивается в 5.7 триллиона рублей. Использование предложенного подхода может послужить дополнительным аргументом в обосновании необходимости разработки законодательных актов для охраны именно почв, как уникальных природных объектов.

Ключевые слова: экосистемные услуги; оценка почв; функции почв.

Methodology for assessing the soil contribution to ecosystem services

© 2026 I. Yu. Savin^{1,2*}, D. A. Soloviev^{1**}, K. S. Orlova^{1***},
P. M. Sapozhnikov³, A. Yu. Romanovskaya^{1****}

¹Federal Research Centre “V.V. Dokuchaev Soil Science Institute”,
7 Bld. 2 Pyzhevskiy per., Moscow 119017, Russian Federation,
*<https://orcid.org/0000-0002-8739-5441>, e-mail: savin_iyu@esoil.ru,

**<https://orcid.org/0009-0004-3590-754X>

***<https://orcid.org/0000-0003-3063-0604>,

****<https://orcid.org/0000-0001-9434-3095>.

²Environmental engineering Institute of RUDN University,
8s5, Podolskoe shosse, Moscow, 115093, Russian Federation.

³Lomonosov Moscow State University, Faculty of Soil Science,
1 Leninskie Gori, Moscow 119991, Russian Federation.

Received 24.02.2026, Revised 04.04.2026, Accepted 21.08.2026

Abstract: In recent decades, a scientific field focused on the study of ecosystem services has emerged and is actively developing. Soil is one of the main components of an ecosystem, so its functioning affects many of its services. However, identifying the role of soil in the expression of a particular ecosystem service is still an unresolved problem, because its components interact with each other in complex ways, and these interrelations are often poorly understood. The article presents a description of a new methodological approach to estimating soil services based on comparing soil properties with those of the parent material. A demonstration of this approach is provided using the example of assessing of only one of the soil services: when soil is considered as a water depository. It has been established that soil formation can lead not only to an increase in the expression of soil services but also to its decrease, which can be interpreted as soil anti-services. For example, the analysis of such a soil service as water storage across the territory of Russia showed, that in Russia, almost half of its territory exhibits an absence of the soil service under consideration, on one third of the territory this service is well expressed, and on almost 20% of the territory an anti-service is expressed. According to the data obtained, in 12 constituent entities of the Russian Federation, the estimated value of the considered soil service exceeds 100 billion rubles, and the provision of this service by all soils in the country is estimated at 5.7 trillion rubles. The use of the proposed approach may serve as an additional argument in justifying the need to develop legislative acts for the protection of soils specifically, as unique natural objects.

Keywords: ecosystem services; soil assessment; soil functions.

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия возникло и активно развивается научное направление изучения экосистемных сервисов. В основе этого направления лежит понимание того, что экосистемы напрямую или опосредованно приносят человечеству некие специфические выгоды, которые могут и должны быть оценены, в том числе и количественно (экономически), как полноценные сервисы (MEA, 2003; Haines-Young, 2018; Costanza, 2020; Delibaş et al., 2021). Существование подобных сервисов обусловлено самим функционированием экосистем и их компонентов. Почва является одним из основных компонентов экосистемы, поэтому ее функционирование предопределяет многие сервисы экосистемы. Costanza

и др. (2017) определили экосистемные сервисы как “экологические характеристики, функции или процессы, которые прямо или косвенно способствуют благополучию человека: выгоды, которые люди получают от функционирующих экосистем”. Однако выделение роли именно почвы в выраженности того или иного сервиса экосистемы, из-за сложных и порой малоизученных взаимосвязей всех ее компонентов, является сложной, а по мнению некоторых авторов, и вообще неразрешимой задачей, так как не все функции почв могут быть монетизированы (Blanchart, 2018). Несмотря на это, исследования в данном направлении продолжаются. Установлена тесная связь экосистемных сервисов с функциями и свойствами почв (Dominati, 2013; Adhikari, 2016). Благодаря выполнению почвами своих экологических функций, они могут предоставлять людям почвенные экосистемные сервисы в 4 категориях (обеспечивающие, регулирующие, поддерживающие (MEA, 2005)/услуги среды обитания (ТЕЕВ, 2010; CICES, 2017) и культурные сервисы). Например, благодаря функции круговорота питательных элементов почвы одновременно способны обеспечивать плодородие (категория регулирующих сервисов), способствовать росту сельскохозяйственных культур (категория обеспечивающих сервисов), поддерживать жизнедеятельность микробных сообществ (категория поддерживающих сервисов) и пр. (Poreba, 2026). Вклад почв в экосистемные сервисы вполне может рассматриваться как услуга именно почв.

Из всех сервисов почв наиболее изученным является их плодородие, т. к. именно оно предопределяет обеспечение населения продовольствием и существование почти всего живого на Земле. Практически вся существующая в настоящее время оценка качества почв подразумевает выраженность именно этой функции и сервиса почв (FAO, 1976; Востокова и др, 2010). Но, почвам свойственны и другие важные функции и сервисы. О них упоминается во многих публикациях (Добровольский, Никитин, 1990; Adhikari, 2016; O’Riordan, 2021; Anikwe, 2023; Mandal, 2024; Poreba, 2026). Их качественная и, тем более количественная, оценка проводится очень редко. Недостаточная проработанность методических подходов к оценке других сервисов почв приводит к за-

нижению оценок значимости, стоимости почв и их роли в жизни человека и существовании биосферы.

Целью данной статьи является описание предлагаемого методического подхода к оценке сервисов почв и демонстрация этого подхода на примере оценки сервиса почвы как источника воды.

СЕРВИСЫ ПОЧВ

До начала 2010-х гг. роли почв в структуре экосистемных сервисов уделялось мало внимания. В работах (Смагин, 2010; Dominati, 2010, 2013; Robinson, 2014; Adhikari, 2016; EEA Report, 2020) рассмотрены структура и механизмы реализации сервисов, оказываемых именно почвами (как одного из компонентов экосистемы). Большинство авторов выделяют следующие основные сервисы почв:

- Почва как среда обитания для разнообразных организмов на Земле, включая бактерии, грибы, червей, насекомых и мелких животных. Она является физической основой для роста растений и обитания микробов. Почва поддерживает структуру, которая необходима для роста растений и обитания микроорганизмов.
- Почва как матрица биологического разнообразия. Почва является хранилищем биологического разнообразия, включая семена, споры и другие организмы.
- Почва как источник питательных веществ для роста растений, источник питания для микроорганизмов и животных.
- Почва как депозитарий воды. Она способна удерживать воду, что важно для растений и микроорганизмов. Почва играет важную роль в круговороте воды и обеспечении водой процессов жизнедеятельности в биосфере.
Почва очищает воду. Она действует как фильтр, задерживая и очищая воду от различных загрязнителей, таких как химические вещества и микроорганизмы, то есть, она вносит свой вклад в качество доступной воды.
- Почва – регулятор биогеохимических циклов. Она играет важную роль в регулировании биогеохимических циклов, таких как круговорот углерода, азота и других химических

элементов в биосфере.

- Почва предопределяет условия для рекреации (отдых на природе), имеет эстетическую ценность, научное и образовательное значение, способствует духовному обогащению человека.

Конечно же существуют и другие, менее выраженные сервисы, предоставляемые почвой (Конюшков, 2015; Latawies, 2022), но вышеперечисленные являются наиболее значимыми, изученными и очевидными.

Практическая реализация (выраженность) этих сервисов зависит не только от свойств почв, но и от специфики других компонентов экосистемы (растительность, климат, особенности использования земель). Но потенциальные возможности предоставления сервисов почвами, предопределяются исключительно их свойствами и функциями. Поэтому при оценке почвенных сервисов более логичным выглядит опора именно на потенциальные, а не на актуальные возможности почв их предоставлять.

СУЩЕСТВУЮЩИЕ ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ СЕРВИСОВ ПОЧВ

Оценка сервисов почв напрямую связана с оценкой их качества (Ugwuegbu, 2024; Kim, 2025). При агроэкологической, как, впрочем, и при кадастровой оценке почв мерилom их качества до сих пор в большинстве случаев выступало и выступает актуальное или потенциальное плодородие (Карманов, Булгаков, 2012; Кирюшин, 2020). Это связано с тем, что оценка качества почв в основном использовалась для планирования использования земель в сельском хозяйстве и в меньшей степени при расчете налогов на землю, которые для сельскохозяйственных угодий также основываются на анализе потенциального плодородия почв.

Менее распространены подходы, в которых делается попытка при оценке учесть весь комплекс функций и свойств почв, а не только их плодородие (Cortinovis, 2017; Blanchart, 2018; Vasenev, 2018). Но и в этих подходах часто учитываются не все сервисы, а только часть из них, что не позволяет учесть весь комплекс почвенных сервисов.

Для большинства существующих подходов общим является то, что при оценке сервисов почв по факту оцениваются все равно экосистемные сервисы, а не чисто почвенные (Орлова, Савин, 2024).

ПРЕДЛАГАЕМЫЙ ПОДХОД

Основу предлагаемого подхода составляет следующая методология. Практически любой сервис, оказываемый почвой, может оказываться и грунтом (естественным или искусственным). При этом выраженность сервиса может быть отличной от сервиса почвы, причем как в большую, так и в меньшую сторону. С этой точки зрения, формирование сервисов почвы происходит в процессе почвообразования, что и приводит к их отличию от сервисов, предоставляемых грунтом или, в рассматриваемом контексте, почвообразующей породой. Таким образом, оценка выраженности того или иного сервиса почвы может быть проведена путем ее сопоставления с выраженностью аналогичного сервиса у почвообразующей породы.

Оценка может быть проведена как на уровне оценочных шкал, так и в денежном выражении. После оценки подобным образом всех отдельных сервисов почвы выводится интегральная (суммарная) оценка сервисов почвы.

Необходимо учитывать, что подобный подход не позволяет напрямую оценить выраженность экосистемных сервисов, так как экосистемный сервис складывается из сервиса почвы, сервиса растительности и живых организмов, сервиса субстрата и т. п. Подход нацелен на оценку лишь сервиса почв.

Проиллюстрируем предлагаемый подход на основе анализа сервиса почвы как депозитария (хранилища) воды. Проблема истощения водных ресурсов в настоящий момент является одной из основных в мире и продолжает углубляться во многих странах (Aquaduct, 2025). В первую очередь, это касается воды, необходимой для сельскохозяйственного производства, хотя в отдельных странах речь идет и о доступности воды непосредственно населению. Это приводит к идеям оценок водного следа в любой продукции, по аналогии с углеродным следом, и формирования рынка водных единиц (Hoekstra, 2003). Почва является одним из значи-

мых резервуаров воды в биосфере. Согласно данным (Gleick, 1996), почвы мира содержат всего около 0.001% всех водных ресурсов планеты, но именно эта вода является основой для роста растений и получения сельскохозяйственной продукции. При этом потенциальные возможности содержания воды в почвах могут существенно отличаться от этой величины. Потенциально в достаточно грубом приближении каждая почва может содержать в своем профиле доступную для растений влагу, равную разности между полевой влагоемкостью и влажностью завядания (влагоемкость почвы (Роде, 1969; Зайдельман, 1985), water holding capacity (Zhang et al., 2021)) (ВП). Этот потенциальный резервуар может полностью заполняться, или быть полностью исчерпанным в зависимости от метеорологических условий, уровня грунтовых вод и потребления воды растительностью. Но потенциально почва может держать в профиле такое количество доступной влаги, которое равно именно ВП. Поэтому мы предлагаем использовать этот параметр в качестве индикатора выраженности сервиса почвы как депозитария воды. Таким образом, оценка этого сервиса может сводиться к тому, чтобы оценить разницу между количеством потенциально удерживаемой в профиле почвы воды и воды, потенциально удерживаемой почвообразующей породой в таком же слое, как и все остальные горизонты почвы.

Оценка была проведена на основе данных Единого государственного реестра почвенных ресурсов РФ (Столбовой, Молчанов, 2014). Для каждой почвы на основе информации этого источника экспертно была установлена мощность профиля почвы (до горизонта С) и мощность основных почвенных горизонтов. Далее для каждого горизонта была рассчитана величина ВП и содержание влаги во всем профиле почвы. Для расчета ВП использовались педотрансферные модели, разработанные П.М. Сапожниковым, А.Н. Прохоровым и Гончаровой Е.М. (1992а, б). После чего было рассчитано содержание влаги в такой же толще почвы, если бы она по свойствам соответствовала горизонту С. Разница между этими величинами и использовалась в качестве критерия оценки вклада почвообразования в рассматриваемый сервис почв. Полученные данные были осреднены для каждого выдела ЕГРПР и представлены в виде карт (рис. 1 и 2).

Полученные данные показали, что почвообразование для некоторых почв приводит к усилению рассматриваемого сервиса, а в других – к уменьшению его выраженности. Последние случаи, с нашей точки зрения, можно трактовать как некий антисервис. По данным моделирования оказалось, что в России на более чем 49.30% территории отмечается отсутствие рассматриваемого сервиса почв, на 30.71% территории этот сервис выражен хорошо, и на 19.99% территории выражен именно антисервис.

На основе предлагаемого подхода величину выраженности данного сервиса почв можно оценить количественно как на уровне почвенно-картографических выделов, так и на уровне регионов или всей страны (рис. 1, 2). Так, согласно полученным данным, для всей территории России почвообразование привело к дополнительному потенциальному удержанию воды в почвах в объеме 136.9 км³. По грубым оценкам, этот объем воды эквивалентен 9 млн тонн зерна пшеницы (с учетом того, что на производство 1 кг зерна расходуется приблизительно 1.5 т воды (Hoekstra, 2003)). А с учетом текущих цен на зерно на рынке (например, если принять 100 руб./кг) можно получить грубую оценку рассматриваемого сервиса почв в рублях (рис. 3). Как следует из рисунка 3, для некоторых выделов ЕГРП оценка сервиса почв в расчете на квадратный метр составляет 15–18 рублей. Больше всего таких выделов расположено на северо-востоке ЕТР, на юге Западной Сибири и в Восточной Сибири. В среднем по России эта величина составляет около 6 рублей на квадратный метр. Агрегация результатов оценки на административные выделы (рис. 4) показывает, что в наибольшей степени рассматриваемый сервис почв выражен в Республике Коми и на территории Хабаровского края. В 12 субъектах РФ оценочная стоимость рассматриваемого сервиса почв превышает 100 миллиардов рублей, превышая в Республике Коми 1 триллион рублей (табл. 1). Согласно полученным данным предоставление данного сервиса всеми почвами в стране эквивалентно стоимости 5.7 триллионов рублей.

Таблица 1. Оценочная стоимость сервиса почв по удержанию воды некоторых субъектов РФ

Table 1. Estimated value of the water storage service, performed by the soil, in selected constituent entities of the Russian Federation

Субъект РФ	Оценочная стоимость, млн руб.
Республика Коми	1052033.3
Хабаровский край	847700.4
Магаданская область	435409.3
Ханты-Мансийский АО	388574.2
Республика Саха (Якутия)	376622.0
Архангельская область	368363.2
Вологодская область	355133.7
Эвенкийский АО	344593.4
Томская область	305647.7
Иркутская область	244039.3
Корякский АО	110597.0
Ленинградская область	103600.9

ОБСУЖДЕНИЕ

Предлагаемый подход позволяет оценивать сервисы именно почв, а не экосистем, как это практически всегда делается. Общая стратегия оценки может заключаться в оценке каждого из сервисов в отдельности по аналогии с приведенным выше примером с дальнейшей интегральной оценкой всех известных сервисов почв на основе такого же подхода. Это позволит учитывать при оценке почв и их значимости не только сервис плодородия, как это делается обычно (Карманов, Булгаков, 2012), но и учитывать другие сервисы, что, с нашей точки зрения, может существенно повысить понимание значимости почв в жизни человека и их ценности. Кроме того, предлагаемый подход позволяет вычленить и оценить роль именно почв, а не экосистем в целом. В этом есть как положительные, так и негативные моменты. Положительным является то, что появится возможность оценки именно почв как отдельного уникального природного объекта, тем самым подчеркивая значи-

мость именно этого объекта в жизни человека. Отрицательным может быть то, что для решения практических задач в большинстве случаев оценки только почв недостаточно. Даже в приведенном выше примере оценка сервиса почв отражает лишь вклад почвы, не учитывая вклада самой почвообразующей породы, которая и без почв может удерживать воду в заданном слое грунта. Таким образом, полная оценка экосистемного сервиса удержания воды складывается из водоудерживающей способности грунта (почвообразующей породы) и оценки вклада почвообразования в ее изменение, что и является целью предлагаемого нами подхода.

Более того, предложенная концепция антисервисов, с нашей точки зрения, позволяет взглянуть на проблему более комплексно, учитывая то, что почвообразование может приводить не только к увеличению, но и к уменьшению выраженности экосистемных сервисов.

Внедрение предлагаемого подхода направлено на вычленение роли непосредственно почв в экосистемных услугах, что может послужить дополнительным аргументом в обосновании необходимости разработки законодательных актов для охраны именно почв как уникальных природных объектов, на что направлены усилия многих почвоведов (Андреева, Клюканова, 2025).

Приведенный выше пример оценки сервиса почв по удержанию в профиле воды достаточно схематичен. Его целью является лишь иллюстрация предлагаемого подхода. Использование более точных входных данных и моделей может привести к результату, который будет отличаться от представленного в статье. Более того, подход может быть использован на любом уровне обобщения, а не только на уровне страны, как это продемонстрировано в нашем примере.

Важной спецификой подхода является то, что он базируется на потенциальной влагоемкости почв (максимально возможной), которая может кардинально отличаться от реального количества воды в почвенном профиле, которое сильно зависит от метеорологических условий.

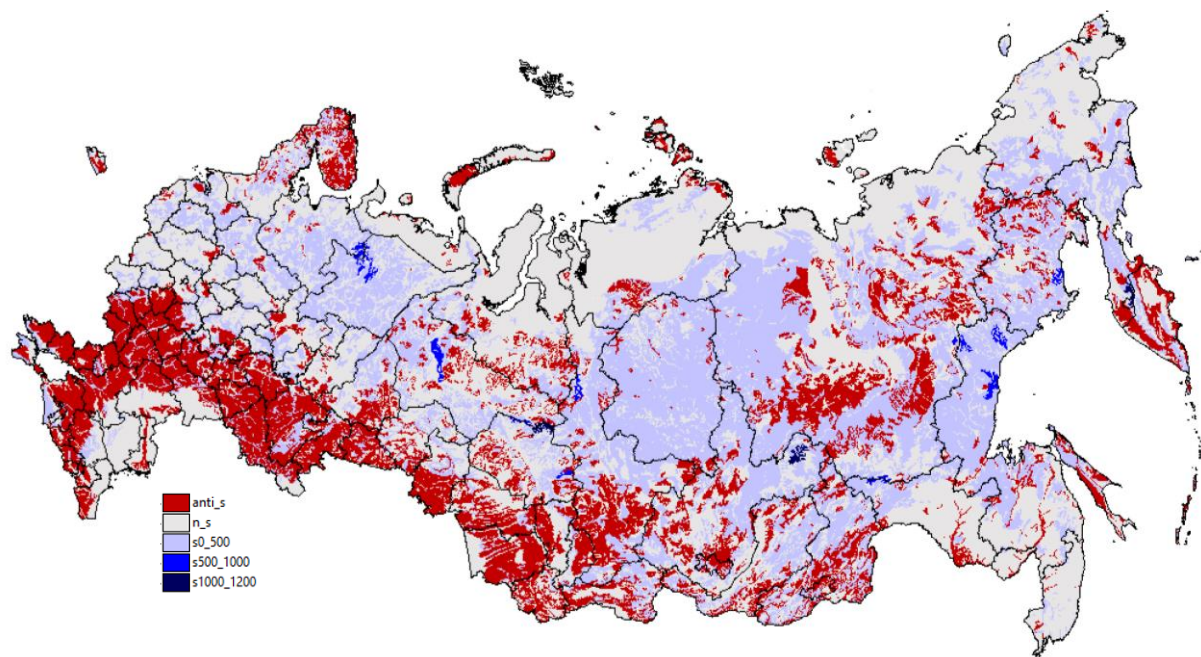


Рис. 1. Оценка сервиса удержания воды в профиле почв в 1000 м^3 на каждый выдел ЕГРПР (anti_s – антисервис; n_s – отсутствие сервиса; s0_500 ... s1000_1200 – классы объема потенциально удерживаемой воды).
Fig. 1. Assessment of the water storage service in the soil profile, $1,000 \text{ m}^3$ per EGRPR unit (anti_s – anti-service; n_s – no service; s0_500 ... s1000_1200 – classes of potentially stored water volume).

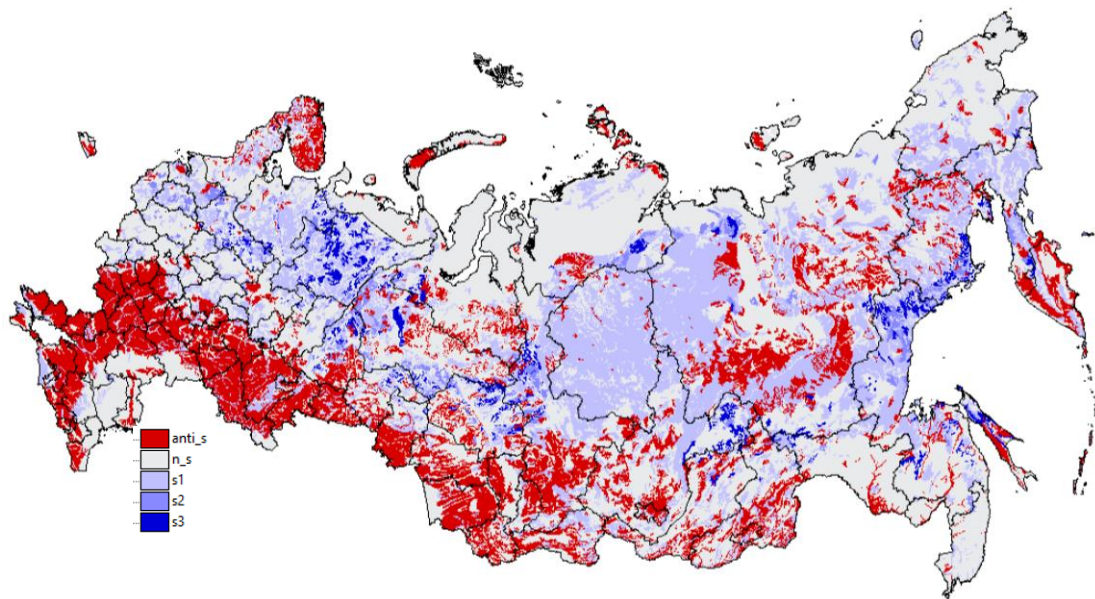


Рис. 2. Выраженность сервиса удержания воды в профиле почв в процентах от выдела ЕГРПР (anti_s – антисервис; n_s – отсутствие сервиса; s1 – менее 50% почв выдела обладает сервисом; s2 – 50-75% почв выдела обладает сервисом; s3 – более 75% почв выдела обладает сервисом).

Fig. 2. Expression of the water storage service in the soil profile as a percentage of the EGRPR mapping unit (anti_s – anti-service; n_s – no service; s1 – less than 50% of soils in the unit provide the service; s2 – 50–75% of soils in the unit provide the service; s3 – more than 75% of soils in the unit provide the service).

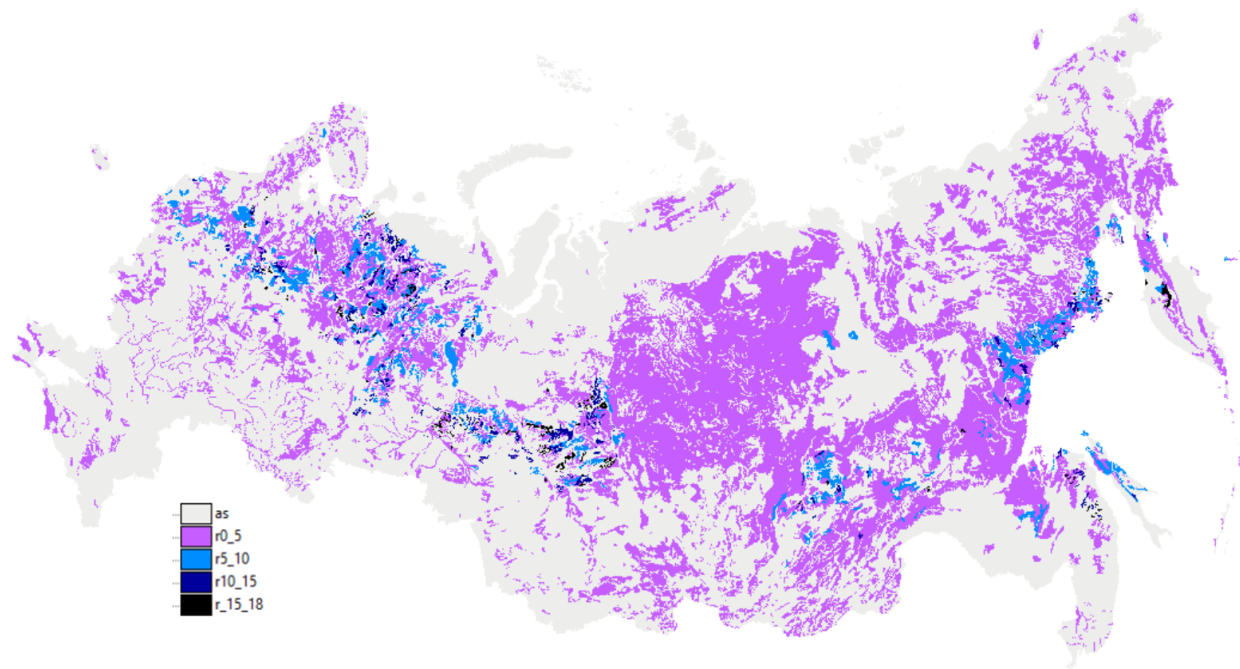


Рис. 3. Оценка сервиса удержания воды в профиле почв в рублях на м^2 (as – антисервис или отсутствие сервиса; r0_5 ... r15_18 – классы стоимости).

Fig. 3. Valuation of the soil profile water storage service in rubles per m^2 (as – anti-service or no service; r0_5 ... r15_18 – value classes).

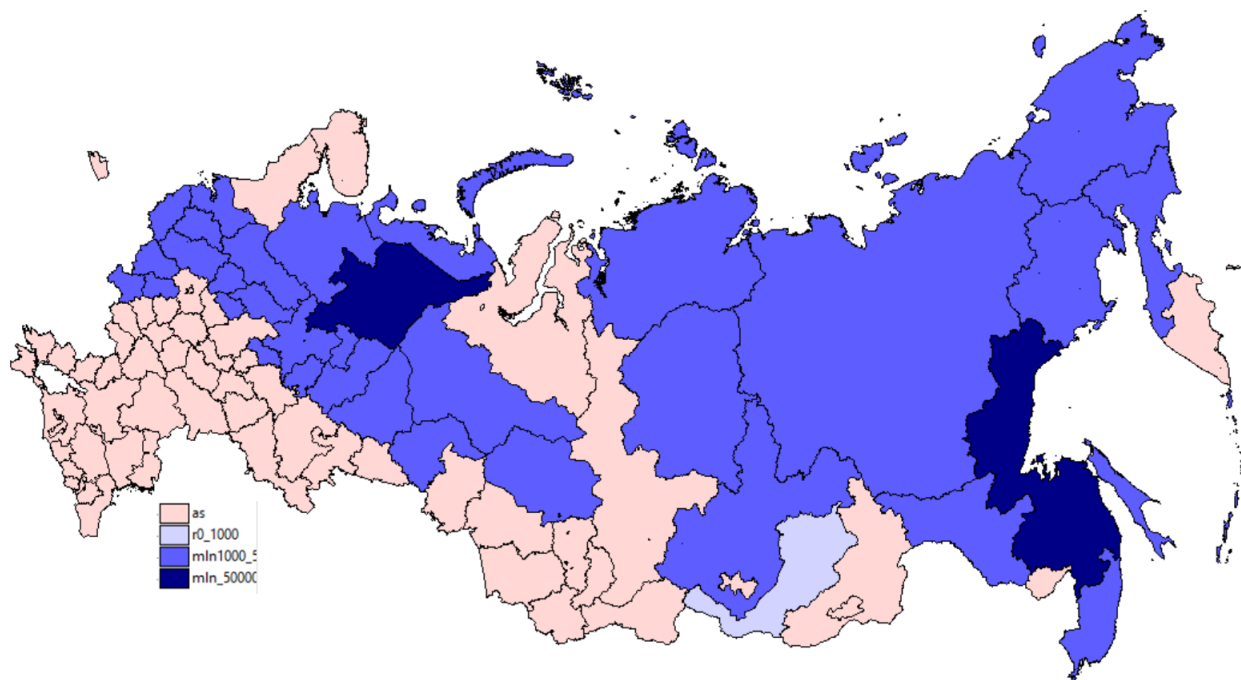


Рис. 4. Оценка сервиса удержания воды в профиле почв в миллионах рублей на субъект РФ (as – антисервис или отсутствие сервиса; r0_1000 ... mln_5000000 – классы стоимостной оценки).

Fig. 4. Valuation of the soil profile water storage service in millions of rubles per constituent entity of the Russian Federation (as – anti-service or no service; r0_1000 ... mln_5000000 – valuation classes).

Кроме того, оценка рассматриваемого сервиса только с точки зрения потенциального количества зерна, которое можно получить при использовании почвенной воды, также не идеальна, так как не учитывает возможности использования воды почв для других (не сельскохозяйственных) целей, а также то, что возможности получения зерна зависят не только от количества содержащейся в почве воды.

ВЫВОДЫ

Предложен новый подход к оценке сервисов почв, основанный на анализе роли именно почвообразования в выраженности сервисов. На основе предложенного подхода могут быть оценены сервисы почв, а не экосистем в целом.

Почвообразование может приводить не только к усилению выраженности сервисов почв, но и к ее уменьшению, что может быть интерпретировано как антисервисы почв.

Выраженность сервисов почв может быть оценена на основе предложенного подхода количественно, в том числе и в стоимости сервиса.

Использование подхода может послужить дополнительным аргументом в обосновании необходимости разработки законодательных актов для охраны именно почв как уникальных природных объектов.

В качестве примера анализ выраженности сервиса почв как депозитария воды на территории России показал, что в России на более чем 49.30% территории отмечается отсутствие рассматриваемого сервиса почв, на 30.71% территории этот сервис выражен хорошо, и на 19.99% территории выражен именно антисервис.

Согласно полученным данным в 12 субъектах РФ оценочная стоимость рассматриваемого сервиса почв превышает 100 миллиардов рублей, а предоставление данного сервиса всеми почвами в стране эквивалентно стоимости 5.7 триллионов рублей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреева, Е.М.; Клюканова, Л.Г. Механизмы правового регулирования охраны почв в странах Содружества Независимых

- Государств: пути интеграции. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Право* **2025**, (2), 497–513.
<https://doi.org/10.21638/spbu14.2025.214>.
2. Востокова, Л.Б.; Булгаков, Д.С.; Орешникова, Н.В.; Яковлев, А.С. *Бонитировка почв в системе земельного кадастра*; Макс-пресс: Москва, 2010; 300 с.
3. Добровольский, Г.В.; Никитин, Е.Д. *Функции почв в биосфере и экосистемах*; Наука: Москва, 1990; 270 с.
4. Зайдельман, Ф.Р. *Гидрологический режим почв Нечерноземной зоны*; Гидрометеиздат: Ленинград, 1985; 314 с.
5. Кирюшин, В.И. Методология комплексной оценки сельскохозяйственных земель. *Почвоведение* **2020**, (7), 871–879.
6. Конюшков, Д.Е. Формирование и развитие концепции экосистемных услуг: обзор зарубежных публикаций. *Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева* **2015**, (80), 26–49.
<https://doi.org/10.19047/0136-1694-2015-80-26-49>.
7. Орлова, К.С.; Савин, И.Ю. Экосистемные сервисы, реализуемые городскими почвами, и их оценка (обзор). *Почвоведение* **2024**, (6), 889–902.
8. Роде, А.А. *Основы учения о почвенной влаге. Том II*; Гидрометеиздат: Ленинград, 1969; 286 с.
9. Сапожников, П.М.; Прохоров, А.Н. Подходы к расчету показателей мониторинга физического состояния почв. *Почвоведение* **1992**, (9), 52.
10. Сапожников, П.М.; Гончарова, Е.М.; Прохоров, А.Н. Модель расчета основной гидрофизической характеристики по базовым показателям физического состояния почв. *Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук* **1992**, (9), 22.
11. Смагин, А.В. Городские почвы. *Природа* **2010**, (7), 15–24.
12. Столбовой, В.С.; Молчанов, Э.Н. Единый государственный реестр почвенных ресурсов России как модель пространственной организации почвенного покрова. *Известия Российской академии наук. Серия географическая* **2015**, (5), 135–143. <https://doi.org/10.15356/0373-2444-2015-5-135-143>.
13. Adhikari, K.; Hartemink, A.E. Linking Soils to Ecosystem Services – A Global Review. *Geoderma* **2016**, (262), 101–111.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.009>.
14. Aqueduct. Using Cutting-Edge Data to Identify and Evaluate Water Risks around the World. <https://www.wri.org/aqueduct>.
15. Blanchart, A.; Séré, G.; Cherel, J.; Warot, G.; Stas, M.; Consalès, J.-N.; Morel, J.-L.; Schwartz, C. Towards an Operational Methodology to Optimize Ecosystem Services Provided by Urban Soils. *Landscape and Urban Planning*

- 2018**, (176), 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2018.03.019>.
16. Costanza, R. Valuing Natural Capital and Ecosystem Services toward the Goals of Efficiency, Fairness, and Sustainability. *Ecosystem Services* **2020**, (43), 101096. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2020.101096>.
17. Cortinovis, C.; Geneletti, D. Ecosystem Services in Urban Plans: What Is There, and What Is Still Needed for Better Decisions. *Land Use Policy* **2017**, (70), 298–312. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.10.017>.
18. Delibaş, M.; Tezer, A.; Kuzniecowa Bacchin, T. Towards Embedding Soil Ecosystem Services in Spatial Planning. *Cities* **2021**, (113), 103150. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2021.103150>.
19. Dominati, E.; Patterson, M.; Mackay, A. A Framework for Classifying and Quantifying the Natural Capital and Ecosystem Services of Soils. *Ecological Economics* **2010**, (69), 1858–1868. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2010.05.002>.
20. Dominati, E. Natural Capital and Ecosystem Services of Soils. In *Ecosystem Services in New Zealand – Conditions and Trends*; Manaaki Whenua Press: Lincoln, New Zealand, 2013; 11 p.
21. EEA Report. *Healthy Environment, Healthy Lives: How the Environment Influences Health and Well-Being in Europe*; Publications Office of the European Union: Luxembourg, 2020; 172 p.
22. FAO Soils Bulletin 32. *Soil Resources Development and Conservation Service, Land and Water Development Division*; FAO: Rome, 1976. <https://www.fao.org/4/x5310e/x5310e00.htm>.
23. Gleick, P.H. Water Resources. In *Encyclopedia of Climate and Weather*; Schneider, S.H., Ed.; Oxford University Press: New York, 1996; Vol. 2, pp 817–823.
24. Haines-Young, R.; Potschin, M.B. Common International Classification of Ecosystem Services (CICES) V5.1 and Guidance on the Application of the Revised Structure. *One Ecosystem* **2018**, (3), e27108. <https://doi.org/10.3897/oneeco.3.e27108>.
25. Hoekstra, A.Y. Virtual Water Trade: Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade, Delft, The Netherlands, 12–13 December 2002; Value of Water Research Report Series No. 12; UNESCO-IHE: Delft, The Netherlands, 2003.
26. Latawiec, A.; Rodrigues, A.; Korys, K.; Medeiros, B. Methodical Aspects of Soil Ecosystem Services Valuation. *Journal of Agricultural Engineering* **2022**, (26), 39–49. <https://doi.org/10.2478/agriceng-2022-0004>.
27. MEA – *Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and Human Well-Being: A Framework for Assessment*; Island Press: Washington, DC, 2003; 155 p.
28. Robinson, D.; Fraser, I.; Dominati, E.; Davidsdottir, B.; Jónsson, J.; Jones,

- L.; Jones, S.; et al. On the Value of Soil Resources in the Context of Natural Capital and Ecosystem Service Delivery. *Soil Science Society of America Journal* **2014**, (78), 685–700. <https://doi.org/10.2136/sssaj2014.01.0017.5>.
29. Vasenev, V.; van Oudenhoven, A.; Romzaykina, O.; Hajiaghaeva, R. The Ecological Functions and Ecosystem Services of Urban and Technogenic Soils: From Theory to Practice (A Review). *Eurasian Soil Science* **2018**, (51), 1119–1132. <https://doi.org/10.1134/S1064229318100137>.
30. Zhang, Y.-w.; Wang, K.-b.; Wang, J.; et al. Changes in Soil Water Holding Capacity and Water Availability Following Vegetation Restoration on the Chinese Loess Plateau. *Scientific Reports* **2021**, (11), 9692. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-88914-0>.
31. MEA (Millennium Ecosystem Assessment). Dryland Systems. In *Ecosystems and Human Well-Being: Current State and Trends*; Hassan, R., Scholes, R., Ash, N., Eds.; Island Press: Washington, DC, 2005; pp 623–662.
32. TEEB. *The Economics of Ecosystems and Biodiversity. Mainstreaming the Economics of Nature: A Synthesis of the Approach, Conclusions and Recommendations of TEEB*; Progress Press: Malta, 2010; 39 p.
33. Haines-Young, R.; Potschin, M.B. Common International Classification of Ecosystem Services (CICES) V5.1 and Guidance on the Application of the Revised Structure. *One Ecosystem* **2017**, (3), e27108. <https://doi.org/10.3897/oneeco.3.e27108>.
34. Ugwuegbu, V.; Greve, M.; Gomes, L.; Verdoodt, A. Spatial Assessment of Soil Ecosystem Services in Denmark. 2024. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.24993.06247>.
35. O’Riordan, R.; Davies, J.; Stevens, C.; Quinton, J.N.; Boyko, C. The Ecosystem Services of Urban Soils: A Review. *Geoderma* **2021**, (395), 115076. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115076>.
36. Poreba, L.; Glowienka, E.; Siebielec, G. Soil Ecosystem Services in Urban Areas and Methods for Their Assessment Using Remote Sensing. *Frontiers in Environmental Science* **2026**, (13), 1734143. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2025.1734143>.
37. Anikwe, M.A.N.; Ife, K. The Role of Soil Ecosystem Services in the Circular Bioeconomy. *Frontiers in Soil Science* **2023**, (3), 1209100. <https://doi.org/10.3389/fsoil.2023.1209100>.
38. Mandal, D.; Golui, D.; Das, D. Indicators of Ecosystem Services of Soil and Water Conservation Practices. 2024, (24), 171–186.

REFERENCES

1. Andreeva, E.M.; Klyukanova, L.G. Mechanisms of Legal Regulation of Soil Protection in the Countries of the Commonwealth of Independent States:

- Pathways to Integration. *Vestnik of Saint Petersburg University. Law* **2025**, (2), 497–513. <https://doi.org/10.21638/spbu14.2025.214>. (In Russ.)
2. Vostokova, L.B.; Bulgakov, D.S.; Oreshnikova, N.V.; Yakovlev, A.S. *Soil Rating in the Land Cadastre System*; Maks-press: Moscow, 2010; 300 p. (In Russ.)
3. Dobrovolsky, G.V.; Nikitin, E.D. *Functions of Soils in the Biosphere and Ecosystems*; Nauka: Moscow, 1990; 270 p. (In Russ.)
4. Zaidelman, F.R. *Hydrological Regime of Soils in the Non-Chernozem Zone*; Gidrometeoizdat: Leningrad, 1985; 314 p. (In Russ.)
5. Kiryushin, V.I. Methodology of Integrated Assessment of Agricultural Lands. *Pochvovedenie*, **2020**, (7), 871–879. (In Russ.)
6. Konyushkov, D.E. The Development of the Concept of Ecosystem Services: A Review of Foreign Publications. *Dokuchaev Soil Bulletin* **2015**, (80), 26–49. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2015-80-26-49>. (In Russ.)
7. Orlova, K.S.; Savin, I.Yu. Ecosystem Services Provided by Urban Soils and Their Assessment (Review). *Pochvovedenie* **2024**, (6), 889–902. (In Russ.)
8. Rode, A.A. *Fundamentals of the Doctrine of Soil Moisture. Volume II*; Gidrometeoizdat: Leningrad, 1969; 286 p. (In Russ.)
9. Sapozhnikov, P.M.; Prokhorov, A.N. Approaches to Calculating Indicators for Monitoring the Physical State of Soils. *Pochvovedenie* **1992**, (9), 52. (In Russ.)
10. Sapozhnikov, P.M.; Goncharova, E.M.; Prokhorov, A.N. A Model for Calculating the Main Hydrophysical Characteristic Based on Basic Indicators of the Physical State of Soils. *Russian Agricultural Sciences* **1992**, (9), 22. (In Russ.)
11. Smagin, A.V. Urban Soils. *Priroda* **2010**, (7), 15–24. (In Russ.)
12. Stolbovoy, V.S.; Molchanov, E.N. The Unified State Register of Soil Resources of Russia as a Model of the Spatial Organization of Soil Cover. *Izvestiya of the Russian Academy of Sciences. Geographic Series* **2015**, (5), 135–143. <https://doi.org/10.15356/0373-2444-2015-5-135-143>. (In Russ.)
13. Adhikari, K.; Hartemink, A.E. Linking Soils to Ecosystem Services – A Global Review. *Geoderma* **2016**, (262), 101–111. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.009>.
14. Aqueduct. Using Cutting-Edge Data to Identify and Evaluate Water Risks around the World. <https://www.wri.org/aqueduct>.
15. Blanchart, A.; Séré, G.; Cherel, J.; Warot, G.; Stas, M.; Consalès, J.-N.; Morel, J.-L.; Schwartz, C. Towards an Operational Methodology to Optimize Ecosystem Services Provided by Urban Soils. *Landscape and Urban Planning* **2018**, (176), 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2018.03.019>.
16. Costanza, R. Valuing Natural Capital and Ecosystem Services toward the

- Goals of Efficiency, Fairness, and Sustainability. *Ecosystem Services* **2020**, (43), 101096. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2020.101096>.
17. Cortinovis, C.; Geneletti, D. Ecosystem Services in Urban Plans: What Is There, and What Is Still Needed for Better Decisions. *Land Use Policy* **2017**, (70), 298–312. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.10.017>.
18. Delibaş, M.; Tezer, A.; Kuznielow Bacchin, T. Towards Embedding Soil Ecosystem Services in Spatial Planning. *Cities* **2021**, (113), 103150. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2021.103150>.
19. Dominati, E.; Patterson, M.; Mackay, A. A Framework for Classifying and Quantifying the Natural Capital and Ecosystem Services of Soils. *Ecological Economics* **2010**, (69), 1858–1868. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2010.05.002>.
20. Dominati, E. Natural Capital and Ecosystem Services of Soils. In *Ecosystem Services in New Zealand – Conditions and Trends*; Manaaki Whenua Press: Lincoln, New Zealand, 2013; 11 p.
21. EEA Report. *Healthy Environment, Healthy Lives: How the Environment Influences Health and Well-Being in Europe*; Publications Office of the European Union: Luxembourg, 2020; 172 p.
22. FAO Soils Bulletin 32. *Soil Resources Development and Conservation Service, Land and Water Development Division*; FAO: Rome, 1976. <https://www.fao.org/4/x5310e/x5310e00.htm>.
23. Gleick, P.H. Water Resources. In *Encyclopedia of Climate and Weather*; Schneider, S.H., Ed.; Oxford University Press: New York, 1996; Vol. 2, pp 817–823.
24. Haines-Young, R.; Potschin, M.B. Common International Classification of Ecosystem Services (CICES) V5.1 and Guidance on the Application of the Revised Structure. *One Ecosystem* **2018**, (3), e27108. <https://doi.org/10.3897/oneeco.3.e27108>.
25. Hoekstra, A.Y. Virtual Water Trade: Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade, Delft, The Netherlands, 12–13 December 2002; Value of Water Research Report Series No. 12; UNESCO-IHE: Delft, The Netherlands, 2003.
26. Latawiec, A.; Rodrigues, A.; Korys, K.; Medeiros, B. Methodical Aspects of Soil Ecosystem Services Valuation. *Journal of Agricultural Engineering* **2022**, (26), 39–49. <https://doi.org/10.2478/agriceng-2022-0004>.
27. MEA – Millennium Ecosystem Assessment. *Ecosystems and Human Well-Being: A Framework for Assessment*; Island Press: Washington, DC, 2003; 155 p.
28. Robinson, D.; Fraser, I.; Dominati, E.; Davidsdottir, B.; Jónsson, J.; Jones, L.; Jones, S.; et al. On the Value of Soil Resources in the Context of Natural Capital and Ecosystem Service Delivery. *Soil Science Society of America*

- Journal* **2014**, (78), 685–700. <https://doi.org/10.2136/sssaj2014.01.0017.5>.
29. Vasenev, V.; van Oudenhoven, A.; Romzaykina, O.; Hajiaghaeva, R. The Ecological Functions and Ecosystem Services of Urban and Technogenic Soils: From Theory to Practice (A Review). *Eurasian Soil Science* **2018**, (51), 1119–1132. <https://doi.org/10.1134/S1064229318100137>.
30. Zhang, Y.-w.; Wang, K.-b.; Wang, J.; et al. Changes in Soil Water Holding Capacity and Water Availability Following Vegetation Restoration on the Chinese Loess Plateau. *Scientific Reports* **2021**, (11), 9692. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-88914-0>.
31. MEA (Millennium Ecosystem Assessment). Dryland Systems. In *Ecosystems and Human Well-Being: Current State and Trends*; Hassan, R., Scholes, R., Ash, N., Eds.; Island Press: Washington, DC, 2005; pp 623–662.
32. TEEB. *The Economics of Ecosystems and Biodiversity. Mainstreaming the Economics of Nature: A Synthesis of the Approach, Conclusions and Recommendations of TEEB*; Progress Press: Malta, 2010; 39 p.
33. Haines-Young, R.; Potschin, M.B. Common International Classification of Ecosystem Services (CICES) V5.1 and Guidance on the Application of the Revised Structure. *One Ecosystem* **2017**, (3), e27108. <https://doi.org/10.3897/oneeco.3.e27108>.
34. Ugwuegbu, V.; Greve, M.; Gomes, L.; Verdoodt, A. Spatial Assessment of Soil Ecosystem Services in Denmark. 2024. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.24993.06247>.
35. O’Riordan, R.; Davies, J.; Stevens, C.; Quinton, J.N.; Boyko, C. The Ecosystem Services of Urban Soils: A Review. *Geoderma* **2021**, (395), 115076. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115076>.
36. Poreba, L.; Glowienka, E.; Siebielec, G. Soil Ecosystem Services in Urban Areas and Methods for Their Assessment Using Remote Sensing. *Frontiers in Environmental Science* **2026**, (13), 1734143. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2025.1734143>.
37. Anikwe, M.A.N.; Ife, K. The Role of Soil Ecosystem Services in the Circular Bioeconomy. *Frontiers in Soil Science* **2023**, (3), 1209100. <https://doi.org/10.3389/fsoil.2023.1209100>.
38. Mandal, D.; Golui, D.; Das, D. Indicators of Ecosystem Services of Soil and Water Conservation Practices. 2024, (24), 171–186.

===== **ПОЧВЕННАЯ ЭКСПЕРТИЗА** =====

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2026-129-239-258



Ссылки для цитирования:

Дабахов М.В., Дабахова М.В. Оптимизация понятийного аппарата в судебно-экологической экспертизе // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2026. Вып. 129. С. 239-258. DOI: 10.19047/0136-1694-2026-129-239-258

Cite this article as:

Dabakhov M.V., Dabakhova E.V., Optimization of the conceptual framework in forensic environmental expertise, Dokuchaev Soil Bulletin, 2026, V. 129, pp. 239-258, DOI: 10.19047/0136-1694-2026-129-239-258

Благодарность.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, (тема № 121040800147-0 “Почвенные информационные системы и оптимизация использования почвенных ресурсов”).

Вклад авторов. Дабахов М.В. – концептуализация, разработка методологии исследования, руководство исследованием, создание черновика рукописи, написание-рецензирование и редактирование рукописи. Дабахова Е.В. – проведение исследования, визуализация, создание рукописи и ее редактирование. Все авторы ознакомлены с окончательной версией статьи и одобрили ее.

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

Заявление об использовании технологий искусственного интеллекта. При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовались.

Заявление о доступности данных.

Все данные, полученные в ходе этого исследования, включены в опубликованную статью.

Acknowledgments.

The work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project no. 121040800147-0 Soil Information Systems and Optimization of Soil Resource Use.

Authors' contributions. Dabakhov M.V. – conceptualization, methodology, supervision, writing – original draft, writing- review & editing. Dabakhova E.V. – investigation, visualization, writing – review & editing. All authors have reviewed and approved the final version of the article.

Conflicts of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Statement on the use of artificial intelligence technologies.

No generative artificial intelligence technologies were used in the creation of this article.

Data availability.

All data obtained during this study are included in the published article.

Оптимизация понятийного аппарата в судебно-экологической экспертизе

© 2026 г. М. В. Дабахов^{1*}, Е. В. Дабахова^{2**}

¹МГУ им. М.В. Ломоносова, факультет почвоведения, Россия,
119991, Москва, Ленинские горы, 1, стр. 12,

*<https://orcid.org/0000-0002-0480-1521>, e-mail: mvd1969@yandex.ru.

²Центр агробиотехнологий Приволжского исследовательского
медицинского университета, Россия,
603104, Нижний Новгород, пр. Гагарина, д. 70,
**e-mail: dabakhova@yandex.ru.

Поступила в редакцию 21.11.2024, после доработки 27.02.2026,
принята к публикации 21.08.2026

Резюме: В статье на основании практики проведения почвенно-экологических экспертных исследований обоснована необходимость введения в понятийный аппарат, представленный в нормативной базе в области охраны почв, определений, входящих в состав следующих блоков: 1) установление факта негативного воздействия на почвы; 2) установление видов фонового содержания веществ в почвах; 3) установление факта наступления ответственности за вред, причиненный почвам. Предложены определения, устанавливающие факт существования биологически значимых веществ и диапазонов их концентраций, в пределах которых они не могут быть признаны загрязняющими веществами, вариабельности почв в результате действия как антропогенных, так и природных факторов. Для оптимизации системы нормирования и оценки степени загрязнения почв предложены определения различных видов фоновых значений: природное, региональное, локальное фоновое содержание, а также интервал

допустимого отклонения от их значений. Для обеспечения системы возмещения вреда за нарушение законодательства об охране почв необходимо введение понятия “Ответственность за загрязнение и истощение земель (почв)”, а также установление диапазонов концентраций загрязняющих веществ в почвах, при которых наступает экономическая ответственность за негативное воздействие.

Ключевые слова: оценка загрязнения; биологически значимое вещество; фоновое содержание вещества; природоохранное законодательство.

Optimization of the conceptual framework in forensic environmental expertise

© 2026 M. V. Dabakhov^{1*}, E. V. Dabakhova^{2**}

¹Lomonosov Moscow State University,
1 Leninskie Gori, Moscow 119234, Russian Federation,
*<https://orcid.org/0000-0002-0480-1521>, e-mail: mvd1969@yandex.ru.

²Center of Agrobiotechnology of the Volga Region
Research Medical University,
70 Gagarin Ave., Nizhny Novgorod 603104, Russian Federation,
**e-mail: dabakhova@yandex.ru.

Received 21.11.2024, Revised 27.02.2026, Accepted 21.08.2026

Abstract: Based on the practice of conducting soil and environmental expert studies, the article substantiates the need to introduce definitions included in the following blocks into the conceptual framework presented in the regulatory framework in the field of soil protection: 1) establishing the fact of a negative impact on soils; 2) establishing the types of background content of substances in soils; 3) establishing the fact of responsibility for damage caused to soils. Definitions are proposed that establish the existence of biologically significant substances and ranges of their concentrations, within which they cannot be recognized as pollutants, soil variability as a result of both anthropogenic and natural factors. To optimize the system of rationing and assessment of the degree of soil pollution, definitions of various types of background values are proposed: natural, general natural-anthropogenic and local natural-anthropogenic background content, as well as the range of permissible deviations from their values. To ensure a system of compensation for damage for violations of the law on soil protection, it is necessary to introduce the concept of “Responsibility for pollution and depletion of land

(soils)”, as well as the establishment of ranges of concentrations of pollutants in soils, at which there is an economic responsibility for the negative impact.

Keywords: pollution assessment; biologically significant substance; background content of substances; environmental legislation.

ВВЕДЕНИЕ

Заключение эксперта представляет собой наиболее важное доказательство, обосновывающее правовую позицию в суде, что неоднократно отмечалось в публикациях, посвященных правоприменительной практике (Гиверц и др., 2022; Дьяконова, 2022). Это положение справедливо и для судебного рассмотрения споров, связанных с оценкой негативного воздействия людей на почвы как на компонент окружающей среды. При этом обоснованность и достоверность выводов эксперта в значительной степени определяется полнотой и непротиворечивостью нормативно-правовой базы, на основе которой происходит формирование программы исследования, методологии оценки и интерпретации полученных данных, определяются критерии установления достоверности промежуточных и окончательных выводов. В них же содержатся нормативы качества окружающей среды, нормативы воздействия на нее и др.

Природоохранное законодательство в России в настоящее время является одной из наиболее динамично развивающихся отраслей права. При этом отмечается, что в процессе его развития обязательным является следование разрабатываемых эколого-правовых норм головному правовому акту, каковым является соответствующий Кодекс (Вагина, 2015). Следует обратить внимание, что в отношении почв головной природно-ресурсный акт в настоящее время отсутствует, и охрана почв в основном опирается на достаточно обобщенные (касающиеся всей совокупности компонентов природной среды) положения федерального закона “Об охране окружающей среды” от 10.01.2002 г. №7-ФЗ и частично Земельного кодекса РФ от 25.10.2001 г. №136-ФЗ. По всей видимости, именно этим фактом обусловлены многочисленные проблемы, с которыми эксперту приходится сталкиваться в ходе исследований обстоятельств и последствий нарушения законодательства в области охраны почв.

В публикациях, посвященных данной тематике, отмечается, что экономический и организационный механизмы защиты почв в настоящее время сводятся к фискальным административным мерам – штрафам, которые направляются в бюджеты разных уровней (Майорова, Гончарук, 2018). При рассмотрении в судах заключений вскрываются многочисленные противоречия, неполнота и недостаточная обоснованность выводов, что в значительной степени обуславливается системной сложностью, временной и пространственной изменчивостью почв как предмета исследования (Майорова и др., 2014).

Отмечается, что терминология, применяющаяся при судебно-экспертном исследовании, чаще всего исходит из естественных наук (Михалева, 2021), в то время как для ее эффективного использования в судебной экспертизе она должна представлять собой синтез двух начал – юридических и естественно-научных. В противном случае, при толковании естественно-биологических терминов юристами в ходе рассмотрения обстоятельств дела возникают коллизии, препятствующие принятию обоснованных решений.

В связи с этим особую важность приобретает актуализация существующего понятийного аппарата, представленного в нормативно-правовых и нормативно-технических документах, применяющегося в ходе экспертного исследования на этапах формулирования вопросов эксперту, разработки и обоснования программы исследования, а также при формировании системы нормирования негативного воздействия на почвы и ландшафты.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

В настоящее время количество дел, рассматриваемых в различных судебных инстанциях и связанных с оценкой негативного воздействия хозяйственной деятельности человека на компоненты природной среды, и в частности почвы, постоянно растет. Объектами настоящего исследования являются нормативные правовые акты и нормативно-технические документы, содержащие определения (термины) в области охраны почв.

Нормативная база, обеспечивающая судебно-экспертную деятельность, согласно статье 3 федерального закона “О государ-

ственной судебно-экспертной деятельности в Российской Федерации” №73-ФЗ от 31.05.2001 г., включает в себя ряд документов: федеральные законы, постановления Правительства РФ, указы и распоряжения Президента РФ. Кроме этого, экспертом могут использоваться ведомственные нормативные документы, а также государственные стандарты. Так, понятийный аппарат, применяющийся при экспертном почвенно-экологическом исследовании, включает в себя определения, представленные в статье 1 федерального закона “Об охране окружающей среды” №7-ФЗ от 10.01.2002 г., ГОСТ “Почвы. Термины и определения”, нормативных актах Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации и некоторых других ведомств.

При этом можно констатировать, что с момента вступления в силу указанных актов произошло существенное расширение перечня документов, на основе которых в настоящее время производится оценка экологического состояния почв и ландшафтов. Ряд документов претерпел довольно значительные изменения. В качестве примера можно указать на санитарно-гигиенические нормативы ПДК, представленные в ГН 2.1.7.2041-2006 “Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве: гигиенические нормативы”, широко использовавшихся в экологическом нормировании почв и земель. В результате их актуализации, а также последующего принятия СанПиН 1.2.3685-21 “Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания”, их сфера действия сократилась до земель сельскохозяйственного назначения и населенных пунктов.

Одним из наиболее широко используемых документов при оценке вреда, причиненного почвам, стала “Методика исчисления размера вреда, причиненного почвам как объекту охраны окружающей среды” (утв. [Приказом Минприроды России от 08.07.2010 г. №238](#)), которая с момента принятия претерпела несколько редакций, направленных на ужесточение экономических последствий нарушения природоохранного законодательства.

Нельзя не упомянуть документ, вступивший в силу в 2024 г. – “Перечень загрязняющих веществ, в отношении которых применяются меры государственного регулирования в области охраны

окружающей среды” (утв. распоряжением Правительства РФ от 20 октября 2023 г. №2909-р), в соответствии с которым существенно расширен список химических элементов и соединений, признающихся загрязняющими при оценке экологического состава почв.

При этом необходимо отметить, что положения вновь принимаемых документов или новые редакции уже существующих актов в ряде случаев вступают в противоречие с существующей нормативной базой или с научно обоснованными и проверенными практикой специальными знаниями, приобретаемыми в процессе профессиональной подготовки эксперта. Этот факт обуславливает необходимость уточнения целого ряда понятий, используемых при охране почв.

Применяемый метод исследования – анализ материалов судебно-экологических экспертиз, проведенных при рассмотрении дел, связанных с нарушением законодательства РФ об охране почв и земель.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Одним из наиболее проблематичных вопросов, возникающих в ходе экспертного исследования, является установление факта загрязнения почв химическими элементами и соединениями в результате осуществления хозяйственной деятельности. В данном случае речь идет об установлении:

- перечня загрязняющих веществ;
- значения нормативного показателя, превышение которого означает переход почвы в категорию загрязненных объектов;
- количественного интервала допустимых отклонений от показателей природного фона, характерных для конкретной территории, на основе которых устанавливается нормативное значение.

В соответствии с действующей нормативно-правовой базой, все существующие химические элементы и соединения, независимо от их происхождения, являются загрязняющими. Это положение зафиксировано в следующих документах:

- “Перечень загрязняющих веществ, в отношении которых применяются меры государственного регулирования в области охраны окружающей среды” (утв. Распоряжением Правительства РФ от 20.10.2023 г. №2909-р);
- “Обзор судебной практики по вопросам применения законодательства об охране окружающей среды” (утв. Президиумом Верховного Суда Российской Федерации 24.06.2022 г.): *п. 11. “Превышение в почве концентрации вещества, не включенного в Перечень загрязняющих веществ, по сравнению с концентрацией этого вещества на сопредельной территории аналогичного целевого назначения и вида использования может свидетельствовать о причинении вреда окружающей среде”*.

При этом нормативная база игнорирует дуалистическую природу большинства встречающихся в почве химических элементов и соединений, поскольку в ней отсутствует понятие “*природное биологически значимое вещество*” как противовес понятию “*загрязняющее вещество*”. В результате при оценке экологического состояния почв и земель к категории загрязняющих относят необходимые элементы питания растений, независимо от их содержания в почве.

В качестве исключения в некоторых случаях рассматриваются земли сельскохозяйственного назначения, для которых Минсельхозом России установлены градации обеспеченности почв элементами питания (Методические указания..., 2003). Однако для земель иного назначения значимость положений данного документа, как правило, в суде не признается.

Не может подвергаться сомнению факт возможного причинения вреда окружающей среде при избыточном содержании в почвах ряда элементов; однако установление факта загрязнения почвы на основании повышенного относительно природного фонового значения биологически значимого элемента является неверным.

В связи с этим очевидна необходимость введения в нормативную базу понятий “*природное биологически значимое веще-*

ство” и “пороговое содержание биологически значимых веществ” (табл. 1).

Таблица 1. Блок понятий для установления факта негативного воздействия на почву

Table 1. A block of concepts for establishing the fact of a negative impact on soils

Природное биологически значимое вещество	Химический элемент (или соединение), содержащийся в составе почв, необходимый для растительных и животных организмов.
Пороговое содержание природных биологически значимых веществ	Содержание природных биологически значимых веществ в почвах, при котором они не оказывают негативного влияния на природные и сельскохозяйственные экологические системы.
Истощение почвы	Снижение содержания природных биологически значимых веществ в составе почвы, ведущее к негативным изменениям качества почвы.
Вред окружающей среде	Негативное изменение компонентов окружающей среды в результате их загрязнения, истощения, уничтожения, повлекшее за собой деградацию экосистем и снижение качества природных ресурсов.
Вред почве	Негативное изменение почвы в результате ее загрязнения, истощения, уничтожения, захламления, перекрытия, снятия плодородного слоя.

В качестве порогового содержания могут быть использованы верхние границы диапазонов обеспеченности почв элементами питания общепринятых градаций (Методические указания..., 2003) с возможностью их распространения на земли иного назначения (лесного фонда, промышленные и пр.). Целесообразно также введение определения *“истощение почвы”*, которое позволит расширить установленный в статье 1 федерального закона “Об охране окружающей среды” перечень видов негативного воздействия на почву и земли, а также уточнение понятий *“вред окружающей среде”* и *“вред почве”*, которые, помимо загрязнения, должны включить в себя иные виды негативного воздействия, в том числе истощение и уничтожение.

Эти изменения позволяют нормативно зафиксировать разделение области концентраций химических элементов и соединений на две части: 1) диапазон природных концентраций и для земель, на которых производятся мероприятия по повышению плодородия, и природно-технологических концентраций; 2) область загрязнения почв и земель.

Еще один блок понятий, который должен быть закреплен в нормативной базе, используемой при экспертных почвенно-экологических исследованиях, связан с обеспечением системы нормирования содержания химических элементов и соединений в почвах. Согласно п. 5 Постановления Правительства Российской Федерации от 13.02.2019 г. №149 “О разработке, установлении и пересмотре нормативов качества окружающей среды для химических и физических показателей состояния окружающей среды ...”, факт загрязнения почвы устанавливается в случае повышенного содержания веществ относительно санитарно-гигиенических показателей (ПДК, ОДК) или, в случае их отсутствия, значения (в интервале допустимого отклонения) природного фона.

Следует заметить, что при всей важности данного нормативного документа, указанное положение фактически не может быть реализовано. В соответствии с определением, представленным в ГОСТ 27597 “Почвы. Термины и определения”, *“фоновое содержание вещества в почве”* – это содержание вещества в почве, соответствующее его природному составу. В научных публикациях неоднократно указывалось, что исключительно природный

состав почв зафиксировать достаточно сложно, поскольку в настоящее время влияние локальных и трансграничных источников поступления техногенных элементов и соединений на состав почв распространено настолько широко, что чаще всего при оценке экологического состояния почв и ландшафтов специалисты имеют дело с природно-антропогенным фоном (Яковлев, 2022).

При этом работы по определению количественного значения показателей природного или природно-антропогенного фона в России ведутся в крайне ограниченном объеме, недостаточном для использования их результатов в экспертных почвенно-экологических исследованиях. Для восполнения данного пробела государственными контролирующими органами в рамках надзорных мероприятий используется некий “условный фон”, определяемый на основании формулировки, представленной в “Методике исчисления размера вреда, причиненного почвам как объекту охраны окружающей среды” (утв. [Приказом Минприроды России от 08.07.2010 г. №238](#)). “Условный фон” – это значение концентрации загрязняющего вещества на сопредельной территории аналогичного целевого назначения и вида использования, не испытывающей негативного воздействия. Очевидно, что в данном случае имеет место противоречие между ведомственным нормативным актом и положениями Постановления Правительства Российской Федерации от 13.02.2019 г. №149.

Еще одним пробелом в действующей системе нормирования является введенное п. 6 данного постановления понятие “*эталонная площадка*”, на котором должны проводиться исследования по установлению значений природного фона. При этом определение этого понятия в настоящее время не введено в глоссарий нормативных документов, а также не представлены методические разработки, устанавливающие требования, которые должны быть соблюдены при выборе эталонных участков и составлении программы исследований.

Достаточно актуальным вопросом, касающимся установления факта загрязнения, является обоснованность учета неопределенности значения фоновое содержания веществ в почвах. Как указано в п. 5 Постановления Правительства РФ от 13.02.2019 г. №149, при установлении природного фона как норматива качества

почвы необходим учет допустимого отклонения от его значения. При этом в нормативной базе понятие “*интервал допустимого отклонения от значений*” отсутствует, а представляющиеся в протоколах результаты определения химического состава почв в рамках надзорных мероприятий признаются контролирующими органами истинными без учета факторов, связанных с неопределенностью процесса лабораторного анализа и пространственной изменчивостью химического состава почвенного покрова. Результатом является распространенная практика признания почв загрязненными даже в случае превышения содержания химических элементов и соединений на уровне погрешности метода.

Очевидно, что в рамках действующих нормативных документов возможно установление интервала допустимых отклонений в пределах, определяемых неопределенностью, установленной в аттестованных методах выполнения измерений. Однако это возможно только при легитимизации понятия “*интервал допустимого отклонения от значений*”. В дальнейшем необходимо следует признать работу по обоснованию введения в этот интервал неопределенности, обусловленной пространственной изменчивостью почвенного покрова.

Работы в данном направлении ведутся уже в течение длительного времени (Иванов, 2021). Так, в качестве первой формулы для оценки геохимического фона указывается значение среднего значения с диапазоном в два стандартных отклонения (2σ) (Hawkes, Webb, 1962). В дальнейшем научные разработки по установлению диапазона рекомендовали использовать от 1 до 3 значений стандартного отклонения (Hakanson, 1980; Мотузова, 2001). Иванов Д.В. в своем обзоре указывает на наличие детально проработанных стандартов Агентства по охране окружающей среды США (US EPA), включающих подробные алгоритмы определения и практического применения значений регионального фона загрязняющих веществ в почвах как один из этапов принятия решений о ремедиации и (или) о консервации загрязненных территорий (Иванов, 2021).

Однако в настоящее время применение существующих наработок в данной сфере в России возможно только при условии корректировки действующей нормативной базы в области охраны

почв. В связи с этим может быть предложено внесение изменений в нормативную базу или корректировка ряда понятий (табл. 2).

Таблица 2. Блок понятий для установления видов фонового содержания веществ в почвах

Table 2. A block of concepts for determining the types of background content of substances in soils

Природное фоновое содержание вещества в почве (природный фон)	Содержание вещества в почве, соответствующее его природному составу.
Общее (региональное) природно-антропогенное фоновое содержание вещества в почве	Содержание вещества в почве, соответствующее его природному составу с учетом влияния трансграничного переноса на расстояние более 40 км от техногенных и более 10 км от сельскохозяйственных источников загрязнения.
Локальное природно-антропогенное фоновое содержание вещества в почве	Содержание вещества на сопредельной территории аналогичного целевого назначения и вида использования, не испытывающей негативного воздействия от исследуемого источника загрязнения.
Интервал допустимого отклонения от значений	Статистически обоснованный диапазон значений, включающий в себя неопределенность измерения и природные особенности нормируемого объекта.
Эталонная площадка	Земельный участок, используемый для установления регионального фонового содержания (природно-антропогенного фона) вредных веществ в почве и интервалов допустимого отклонения от него в целях установления нормативов качества почвы.

При этом значение природного фона рекомендуется использовать при изучении процессов глобальной геохимической трансформации почв и ландшафтов. Назначение общего (регионального) природно-антропогенного фонового содержания вещества в

почве определяется необходимостью исследования процессов аккумуляции веществ в почвах на уровне отдельных регионов и разработки нормативных значений их содержания. В рамках экспертных почвенно-экологических исследований наиболее актуальным является применение локального природно-антропогенного фона для оценки загрязнения почвы, связанной с негативным воздействием отдельного источника загрязнения. Фактически по смыслу данное понятие соответствует термину *“значение концентрации этого загрязняющего вещества на сопредельной территории аналогичного целевого назначения и вида использования, не испытывающей негативного воздействия от данного вида нарушения”*, применяемого при расчете размера вреда почвам методом такс (Методика исчисления..., 2010), и предназначено для применения в случаях, когда использование значений общего природно-антропогенного фона для оценки негативного влияния конкретного локального источника загрязнения невозможно в связи с множественностью источников антропогенного воздействия (промышленные зоны, населенные пункты и пр.).

Как показывает правоприменительная практика, в настоящее время назрела необходимость более тщательного экономического обоснования нормативной базы, направленной на компенсацию вреда, причиненного в результате нарушения законодательства о почвах. Мониторинг изменений, внесенных в основной документ, используемый для расчета размера вреда почвам как объекту охраны окружающей среды (Методика исчисления..., 2010), показывает, что с момента его принятия, наряду с применением коэффициента дефлятора, учитывающего инфляционную составляющую, практикуется значительный рост повышающих коэффициентов.

Кроме этого, существует практика двойного наказания за вред, причиненный почвам, включающего в себя требование выплаты суммы вреда, причиненного почвам, и не снимающего с ответчика обязанности проведения рекультивации. В качестве примера можно указать на определение Конституционного Суда РФ от 09.02.2016 г. №225-О, в соответствии с которым осуществление мер по рекультивации нарушенного земельного участка не позволяет устранить некие трудновосполнимые потери, факт ко-

торых не устанавливается, и их наличие подразумевается по умолчанию.

Таким образом, имеет место тенденция ужесточения экономических мер, применяемых при нарушении законодательства об охране окружающей среды. В то же время следует отметить, что довольно часто поводом для предъявления иска о загрязнении почв становится превышение фонового содержания веществ, признанных загрязняющими, в пределах погрешности метода анализа или естественной вариабельности почвенного покрова. При этом указания эксперта, опирающегося на специальные знания, о незначительности этих превышений судом, как правило, игнорируются. Данная ситуация обусловлена трактовкой ряда определений, содержащихся в статье 1 федерального закона “Об охране окружающей среды”, в соответствии с которыми понятие “загрязнение окружающей среды” является тождественным понятию превышение “нормативов качества окружающей среды”, к которым при отсутствии нормативов ПДК/ОДК относят фоновое содержание химических элементов и соединений, независимо от их происхождения.

В своем нынешнем виде действующая правовая база является причиной ряда негативных явлений, в том числе:

- роста неплатежей за вред, причиненный почвам, по причине необоснованности их размера;
- увеличения количества и длительности судебных разбирательств по арбитражным, административным и гражданским делам, что затрудняет возможность компенсации вреда, причиненного почвам;
- потенциального увеличения количества банкротств предприятий малого и среднего бизнеса, которые не способны выплачивать начисленные суммы за причиненный вред;
- роста социальной напряженности в результате изъятия средств у предприятий АПК, коммунальных служб и пр., которые возмещаются за счет рядовых потребителей товаров и услуг.

В связи с этим в систему, в рамках которой превышение природного фона химических элементов и соединений в почвах

является основанием для предъявления исков со стороны природоохранных органов, целесообразно внести изменения путем введения в нормативную базу следующих понятий с последующей разработкой и корректированием нормативных документов (табл. 3).

Таблица 3. Блок понятий для установления факта наступления ответственности за вред, причиненный почвам

Table 3. A block of concepts for establishing the fact of the occurrence of economic responsibility for damage caused to soils

Ответственность за загрязнение земель	Обязанность виновника загрязнения почв возместить вред, причиненный почвам, или устранить последствия нарушения природоохранного законодательства.
Ответственность за истощение земель	Обязанность виновника истощения почв возместить вред, причиненный почвам, или устранить последствия нарушения природоохранного законодательства.
Предельные уровни степени загрязнения почв, в т. ч.:	Уровни загрязнения почв, устанавливающие пороговое содержание показателя, при котором осуществляется комплекс мер по предупреждению или ликвидации последствий нарушения.
- предупредительный уровень	Региональное фоновое содержание вещества (природно-антропогенный фон) в интервале допустимого отклонения от значений.
- компенсационный уровень	Превышение верхнего значения интервала допустимого отклонения от регионального фона.

Предлагаемые изменения предусматривают введение двух уровней степени загрязнения почв: предупредительный и компенсационный. В качестве предупредительного уровня может рассматриваться региональное фоновое содержание вещества (природно-антропогенный фон), в пределах которого могут быть рекомендованы мероприятия по выявлению источников потенци-

ального загрязнения и, при необходимости, ограничения их воздействия. Превышение компенсационного уровня предусматривает наступление экономической ответственности за загрязнение, включающей в себя обязательность устранения последствий загрязнения или истощения почв путем возмещения вреда или работки и осуществления мероприятий по устранению последствий нарушения со стороны виновника нарушения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании вышеизложенного может быть рекомендовано внесение в нормативную правовую базу новых понятий, а также осуществление коррекции уже существующих, направленных на использование в практике почвенно-экологических экспертных исследований:

- введение понятий и их определений в систему оценки вариативности, а также последствий химической трансформации почв в результате действия природных и антропогенных факторов, устанавливающих факт существования природных биологически значимых веществ и диапазонов их концентраций, в пределах которых они не могут быть признаны загрязняющими веществами;
- применение в системе нормирования и оценки степени загрязнения почв различных видов фоновых значений “природный”, “региональный” (природно-антропогенный), “локальный” (антропогенный), а также интервалов допустимого отклонения от их значений;
- введение в правоприменительную практику понятия “ответственность за загрязнение и истощение земель (почв)”, а также установление диапазонов концентраций загрязняющих веществ в почвах, при которых наступает экономическая ответственность за негативное воздействие.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вагина, О.В. Основные направления совершенствования российского экологического законодательства. *Бизнес. Менеджмент. Право* **2015**, 2 (32), 60–63.

2. ГОСТ 27597. Почвы. Термины и определения.
<https://docs.cntd.ru/document/1200007341>.
3. Иванов, Д.В. Фоновое содержание загрязняющих веществ как мера нормирования качества природных сред (обзор). *Российский журнал прикладной экологии* **2021**, (4), 55–66.
4. Майорова, Е.И.; Гончарук, Н.Ю. Экологический вред: как определить его размер. *Экология производства* **2018**, (6), 16–23.
5. Майорова, Е.И.; Гончарук, Н.Ю.; Адамова, Э.В. Особенности взаимодействия экспертов-экологов и суда в процессе уголовного судопроизводства. *Теория и практика судебной экспертизы* **2014**, 4 (36), 34–40.
6. Методика исчисления размера вреда, причиненного почвам как объекту охраны окружающей среды: Приказ Минприроды России от 08.07.2010 г. 238.
https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_104774/c77282ceb7cf6eafd15b5541da789167bae337f6.
7. Методические указания по проведению комплексного мониторинга плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения; ФГНУ “Росинформагротех”: Москва, 2003.
https://rupest.ru/files/metodicheskie_ukazaniya.pdf.
8. Мотузова, Г.В. *Почвенно-химический экологический мониторинг*; МГУ: Москва, 2001. 86 с.
9. *Обзор судебной практики по вопросам применения законодательства об охране окружающей среды*; 2022.
<https://www.vsrf.ru/documents/all/31275>.
10. Определение Конституционного Суда РФ от 09.02.2016 г. 225-О.
<https://legalacts.ru/sud/opredelenie-konstitutsionnogo-suda-rf-ot-09022016-n-225-o>.
11. Перечень загрязняющих веществ, в отношении которых применяются меры государственного регулирования в области охраны окружающей среды: Распоряжение Правительства РФ от 20.10.2023 г. 2909-р. *Собрание законодательства Российской Федерации* **2023**, 44 (30 октября).
12. Положение о разработке, установлении и пересмотре нормативов качества окружающей среды для химических и физических показателей состояния окружающей среды (утв. Постановлением Правительства РФ от 13.02.2019 г. 149). <https://docs.cntd.ru/document/552424017>.
13. Яковлев, А.С. Вопросы экологического нормирования и установления фоновых значений свойств почв природных и природно-антропогенных объектов. *Почвоведение* **2022**, (2), 1–9.
14. Håkanson, L. An Ecological Risk Index for Aquatic Pollution Control. A

Sedimentological Approach. *Water Research* **1980**, 14 (8), 975–1001.
[https://doi.org/10.1016/0043-1354\(80\)90143-8](https://doi.org/10.1016/0043-1354(80)90143-8).

15. Hawkes, H.E.; Webb, J.S. *Geochemistry in Mineral Exploration*; Harper & Row: New York, 1962; 415 p.

REFERENCES

1. Vagina, O.V. Main Directions for Improving Russian Environmental Legislation. *Business. Management. Law* **2015**, 2 (32), 60–63. (In Russ.)
2. GOST 27597. Soils. Terms and Definitions. <https://docs.cntd.ru/document/1200007341>. (In Russ.)
3. Ivanov, D.V. Background Content of Pollutants as a Measure for Standardizing the Quality of Natural Environments (Review). *Russian Journal of Applied Ecology* **2021**, 4, 55–66. (In Russ.)
4. Mayorova, E.I.; Goncharuk, N.Yu. Environmental Harm: How to Determine Its Amount. *Ecology of Production* **2018**, 6 (167), 16–23. (In Russ.)
5. Mayorova, E.I.; Goncharuk, N.Yu.; Adamova, E.V. Specifics of Interaction between Environmental Experts and the Court in Criminal Proceedings. *Theory and Practice of Forensic Science* **2014**, 4 (36), 34–40. (In Russ.)
6. Methodology for Calculating the Amount of Harm Caused to Soils as an Object of Environmental Protection: Order of the Ministry of Natural Resources of Russia No. 238 of 08.07.2010. https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_104774/c77282ceb7cf6eafd15b5541da789167bae337f6. (In Russ.)
7. *Methodological Guidelines for Comprehensive Monitoring of Soil Fertility of Agricultural Lands*; FGNU “Rosinformagrotekh”: Moscow, 2003. https://rupest.ru/files/metodicheskie_ukazaniya.pdf. (In Russ.)
8. Motuzova, G.V. *Soil-Chemical Environmental Monitoring*; Moscow State University: Moscow, 2001; 85 p. (In Russ.)
9. *Review of Judicial Practice on the Application of Legislation on Environmental Protection*; 2022. <https://www.vsrp.ru/documents/all/31275>. (In Russ.)
10. Ruling of the Constitutional Court of the Russian Federation No. 225-O of 09.02.2016. <https://legalacts.ru/sud/opredelenie-konstitutsionnogo-suda-rf-ot-09022016-n-225-o>. (In Russ.)
11. List of Pollutants Subject to State Regulation in the Field of Environmental Protection: Order of the Government of the Russian Federation No. 2909-r of 20.10.2023. *Collection of Legislation of the Russian Federation* **2023**, 44 (30 October). (In Russ.)

12. Regulation on the Development, Establishment and Revision of Environmental Quality Standards for Chemical and Physical Indicators of the State of the Environment (Approved by Decree of the Government of the Russian Federation No. 149 of 13.02.2019). <https://docs.cntd.ru/document/552424017>. (In Russ.)
13. Yakovlev, A.S. Issues of Environmental Standardization and Establishment of Background Values of Soil Properties of Natural and Natural-Anthropogenic Objects. *Pochvovedenie* **2022**, (2), 1–9. (In Russ.)
14. Håkanson, L. An Ecological Risk Index for Aquatic Pollution Control. A Sedimentological Approach. *Water Research* **1980**, 14 (8), 975–1001. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(80\)90143-8](https://doi.org/10.1016/0043-1354(80)90143-8).
15. Hawkes, H.E.; Webb, J.S. *Geochemistry in Mineral Exploration*; Harper & Row: New York, 1962; 415 p.

Научное издание

Бюллетень Почвенного института
имени В.В. Докучаева

Выпуск 129

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

Сдано в набор 25.09.2026 г.
Подписано в печать 25.09.2026 г.
Формат 60×84/16. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 15 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