

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

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

БЮЛЛЕТЕНЬ

ПОЧВЕННОГО ИНСТИТУТА

имени В.В. ДОКУЧАЕВА

Выпуск 128

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 128

**Moscow
2026**

<https://bulletin.esoil.ru>

ББК П03
Б 98
УДК 631.4

Главный редактор:
Иванов А. Л., академик РАН

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

Редакционная коллегия:

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

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

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

Editorial board:

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

СОДЕРЖАНИЕ

Применение технологии автоматизированного мониторинга режимов почв для интеллектуальных цифровых платформ

*Болотов А.Г., Калиниченко Р.В., Сворцова Е.Б., Шеин Е.В., Дембовецкий А.В., Филь П.П., Хархардинов Н.А., Шумилин П.А., Иванов А.Л.*5

Изменения в почвенном покрове горных районов Узбекистана за период с 1980-х по 2020-е годы, выявленные по спутниковым данным Landsat

*Савин И.Ю., Гафурова Л.А., Джалилова Г.Т., Романовская А.Ю.*26

Изменения типоморфных характеристик чернозема южного при сельскохозяйственном использовании

*Апарин Б.Ф., Моргач Ю.Р., Сухачева Е.Ю., Кузьмина А.А., Лазарева М.А., Мингареева Е.В., Федорова М.Е.*50

Потенциальное влияние активности термитов на повышение содержания органического углерода и питательных веществ в почве в районе Алас Бром, Каранганьяр

*Ariyanto D., Sucipto C.A., Febriani S., Widijanto H., Himmi S., Tarmadi D., Wikantyo B., Zaki M., Komariah K., Sumani S.*85

Свойства почв постирригационных агроландшафтов Присивашья

*Ергина Е.И., Новицкий М.Л.*118

Содержание подвижных форм Cd и Pb в почвах земель сельскохозяйственного назначения и нормирование их загрязнения

*Захарченко А.В., Пасько О.А., Горячкин В.Н., Тигеев А.А.*147

Распределение фосфора в агрегатах разного размера в дерново-подзолистой почве склонового ландшафта

*Денисова Г.И., Карпова Д.В.*174

Фитомелиоранты для засоленных и солонцеватых почв Причерноморья

*Степанова Е.С.*194

Экологическая оценка последствий рекультивации нефтезагрязненной почвы

*Сапцын Р.В., Еремченко О.З.*214

Минимальная повторность проб при проведении контрольно-надзорных мероприятий для выявления изменения в содержании органического вещества почв

*Мешалкина Ю.Л., Морозов И.В., Самсонова В.П., Замулина И.В., Соловьев Д.А.*241

CONTENTS

Application of automated soil condition monitoring technology for intelligent digital platforms

Bolotov A.G., Kalinichenko R.V., Skvortsova E.B., Shein E.V., Dembovetsky A.V., Fil P.P., Kharhardinov N.A., Shumilin P.A., Ivanov A.L. 5

Soil cover of mountainous regions of Uzbekistan changes from 1980-ies to 2020-ies detected by Landsat images

Savin I.Yu., Gafurova L.A., Djalilova G.T., Romanovskaya A.Yu.26

Changes in typomorphic characteristics of southern chernozem during agricultural use

Aparin B.F., Morgach Yu.R., Sukhacheva E.Yu., Kuzmina A.A., Lazareva N.A., Mingareeva E.V., Fedorova M.E.50

The potential of termite activity to enhance soil organic carbon and nutrient content in Alas Bromo

Ariyanto D., Sucipto C.A., Febriani S., Widijanto H., Himmi S., Tarmadi D., Wikantyo B., Zaki M., Komariah K., Sumani S.85

Properties of soils of post-irrigation agrolandscapes of Sivash Lowland

Ergina E.I., Novitsky M.L.118

The content of mobile forms of Cd and Pb in agricultural soils and standardization of their pollution,

Zakharchenko A.V., Pasko O.A., Goryachkin V.N., Tigeev A.A.....147

Distribution of phosphorus in aggregates of different sizes in sod-podzolic soil of the slope landscape

Denisova G.I., Karpova D.V.....174

Phyto-ameliorants for saline and solonetzic soils of the Black Sea Region

Stepanova E.S.194

Ecological assessment of the consequences of reclamation of oil-polluted soil

Saptsyn R.V., Eremchenko P.Z.214

Minimum repeatability of laboratory tests to identify changes in the content of soil organic matter,

Meshalkina J.L., Morozov I.V., Samsonova V.P., Zamulina I.V., Soloviev D.A.241

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2026-128-5-25



Ссылки для цитирования:

Болотов А.Г., Калиниченко Р.В., Скворцова Е.Б., Шеин Е.В., Дембовецкий А.В., Филь П.П., Хархардинов Н.А., Шумилин П.А., Иванов А.Л. Применение технологии автоматизированного мониторинга режимов почв для интеллектуальных цифровых платформ // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2026. Вып. 128. С. 5-25. DOI: 10.19047/0136-1694-2026-128-5-25

Cite this article as:

Bolotov A.G., Kalinichenko R.V., Skvortsova E.B., Shein E.V., Dembovetsky A.V., Fil P.P., Kharhardinov N.A., Shumilin P.A., Ivanov A.L., Application of automated soil condition monitoring technology for intelligent digital platforms, Dokuchaev Soil Bulletin, 2026, V. 128, pp. 5-25, DOI: 10.19047/0136-1694-2026-128-5-25

Благодарность:

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

Acknowledgments:

The study was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (agreement No. 075-15-2024-545 dated April 24, 2024).

Применение технологии автоматизированного мониторинга режимов почв для интеллектуальных цифровых платформ

© 2026 г. А. Г. Болотов^{1*}, Р. В. Калиниченко¹, Е. Б. Скворцова¹, Е. В. Шеин^{1,2**}, А. В. Дембовецкий^{2***}, П. П. Филь^{2****}, Н. А. Хархардинов^{1*****}, П. А. Шумилин², А. Л. Иванов¹

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

* <https://orcid.org/0000-0002-8264-3266>, e-mail: bolotov@esoil.ru,

** <https://orcid.org/0000-0002-0101-5293>, e-mail: evgeny.shein@gmail.com,

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

**** <https://orcid.org/0000-0002-4084-4991>.

²МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия,
119234, Москва, Ленинские горы, 1, стр. 12,

<https://orcid.org/0000-0002-8568-504X>.

Поступила в редакцию 23.12.2025, после доработки 17.03.2026,
принята к публикации 29.04.2026

Резюме: Теоретически обоснована и разработана стационарная система автоматизированного измерения гидротермических режимов почв, с помощью которой экспериментально проведены регулярные исследования профильного распределения влажности и температуры почв, а также глубины залегания грунтовых вод в условиях Тверской области (опытное поле ВНИИМЗ) на агродерново-подзолистых оглеенных легкосуглинистых почвах. На основе этих данных построены карты хроноизоплант влажности и температуры почвы. Используя послойные значения почвенно-гидрологических констант (ПГК), определенных из основных гидрофизических характеристик, проанализирован водный режим почв с выделением периодов гравитационного стока, переувлажнения и почвенной засухи в годовом цикле. В течение года в исследуемой толще почвы наблюдаются периоды избытка и недостатка влаги для растений, а также периоды быстрого изменения профилей влажности и температуры, обусловленные метеоусловиями, в частности, в конце октября – начале ноября и в конце апреля. Это требует проведения соответствующих агротехнических и мелиоративных мероприятий на исследованных почвах. Получение, накопление и обработка количественных цифровых данных о водном и температурном режимах почв позволяет применять современные методы анализа динамических свойств почв в составе интеллектуальных цифровых платформ, устанавливать строгое количественное соответствие с метеоданными, определять и прогнозировать время наступления критических периодов и научно обоснованно управлять почвенно-мелиоративными процессами.

Ключевые слова: влажность почвы; температура почвы; режим влажности почвы; водный режим почвы; почвенно-гидрологические константы; хроноизопланты.

Application of automated soil condition monitoring technology for intelligent digital platforms

© 2026 A. G. Bolotov^{1*}, R. V. Kalinichenko¹, E. B. Skvortsova¹,
E. V. Shein^{1,2**}, A. V. Dembovetsky^{2***}, P. P. Fil^{2****},
N. A. Kharhardinov^{1*****}, P. A. Shumilin², A. L. Ivanov¹

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>, e-mail: bolotov@esoil.ru,*

*** <https://orcid.org/0000-0002-0101-5293>, e-mail: evgeny.shein@gmail.com,*

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

***** <https://orcid.org/0000-0002-4084-4991>.*

²*Lomonosov Moscow State University,*

12 Bld. 1 Leninskie Gori, Moscow 119234, Russian Federation,

**** <https://orcid.org/0000-0002-8568-504X>.*

Received 23.12.2025, Revised 17.03.2026, Accepted 29.04.2026

Abstract: A stationary system for automated measurement of soil hydrothermal regimes has been theoretically substantiated and developed. This system was used to conduct regular experimental studies of layer-by-layer moisture and temperature, as well as the groundwater depth, in the Tver Region (VNIMZ Experimental Field) on agrosod-podzolic gleyed light loamy soils. These data were used to construct chronoisopleth maps of moisture and temperature using digital methods. Using layer-by-layer values of soil-hydrological constants (SHC), determined from the main hydrophysical characteristics, the soil water regime was analyzed, identifying periods of gravitational runoff, swampiness and soil drought in the annual cycle. Throughout the year, the studied soil layer experiences periods of excess and deficiency of moisture for plants, as well as periods of rapid changes in moisture and temperature throughout the profile due to meteorological conditions, particularly in late October, early November, and late April. This requires appropriate agronomic and reclamation measures for the studied soils. Obtaining, accumulating, and processing quantitative digital data on soil water and temperature regimes enables the application of modern methods for analyzing dynamic soil properties within intelligent digital platforms, establishing strict quantitative correlation with meteorological data, identifying and predicting the onset of critical periods, and scientifically managing soil reclamation processes.

Keywords: soil moisture; soil temperature; soil moisture regime; soil water regime; soil-hydrological constants; chronoisopleths.

ВВЕДЕНИЕ

Динамические данные о влажности, температуре и ряде других быстро изменяющихся свойств почв являются основой для их комплексного исследования и управления. На основе этих данных определяются особенности почвенных гидротермических условий,

классификационная принадлежность почв, сравнительная характеристика режимных наблюдений в разных условиях ландшафта, критические периоды быстрых изменений профильных распределений влажности и температуры, влажностные и температурные оптимумы и другие характеристики функционирования почвенного покрова во времени с учетом рельефа и метеоусловий. Именно динамика этих свойств в почвенной толще определяет основные агротехнические приемы, сроки их применения, а также мелиоративные расчеты и мероприятия (Роде, 1952; Димо, 1972; Болдырев, 1981; Емельянов, Маслов, 1985; Добровольский, Никитин, 1990; Зайдельман, 1996; Шестаков, Поздняков, 2003; Кирюшин, 2011). Кроме того, учитывая широкое применение физически обоснованных математических моделей, необходимо экспериментальное обеспечение для их верификации и адаптации к конкретным почвенно-климатическим условиям, прежде всего, по гидро-термическому режиму почвы в строго определенный контролируемый период времени, с использованием почвенно-гидрологических констант (Роде, 1960; Роде, 1961; Зайдельман, 1985; Кирюшин, 2011).

Стоит отметить, что оптимизация режимов почв стратегически более результативна, чем оптимизация их свойств. Также большое значение имеет не только величина параметров, но и их приращение, и градиент. Экспериментальное определение приращений параметров и в целом режимов предполагает повторные измерения в той же самой точке через определенные интервалы времени, что ставит результаты исследования в зависимость от пространственного варьирования измеряемых параметров и их приращений (Дмитриев, 1972; Козловский, 1991). Исследование режимов почв в разных точках ландшафта предопределяет синхронность измерений динамики их свойств.

Традиционно данные о динамике влажности почвы получали буровыми методами, требующими специальной долговременной подготовки, конкретных условий проведения, а также последующего анализа. Эти методы трудоемки, затратны и не всегда удовлетворяют требованиям, в частности, из-за высокой пространственной вариабельности исследуемых свойств, присущей точечным измерениям. В связи с этим ряд авторов (Полуэктов и

др., 2003; Архангельская, 2020; Gerke et al., 2022) считает, что при отсутствии стандартных методов оперативного “on-line” измерения гидротермических режимов почвы и их параметров в реальных условиях агроландшафта единственным надежным способом получения необходимой информации является расчетный метод с использованием тех или иных математических моделей. В то же время предпринимались попытки автоматизированного (с помощью различных приборов) наблюдения за влажностью и температурой почвы. По нашему мнению, наиболее перспективно применение комплекса современных информационных и математических средств моделирования почвенно-атмосферного теплового переноса с измерительными системами, позволяющими получать экспериментальные значения граничных и начальных условий для моделей гидротермического режима почвы. Такой подход позволит сократить долю инструментальных ресурсов при получении информации о почвенных режимах без потери точности и минимизировать работу по экспериментальному обеспечению входных параметров моделей.

Стоит отметить радиометрические методы на основе нейтронных влагомеров (Kodikara et al., 2014), обладающие рядом недостатков: необходимостью калибровки для конкретных почвенно-климатических условий и др.; “точечный” характер наблюдений (Evet et al., 2008; Boga et al., 2017; Kodikara et al., 2014; Шеин и др., 2019; Nieberding et al., 2023); ряд технико-методических особенностей в виде неравномерной сферы исследования; пристенных эффектов движения влаги и ряда других особенностей (Выржиковский, Кузьмичев, 1968; Емельянов, Маслов, 1985). Это вызвало новую волну методических исследований с применением следующего поколения стационарных датчиков по измерению влажности почвы: кондуктометрических датчиков, гипсовых блоков и пр. (Evet et al., 2008; Abdelal et al., 2025). Однако эти устройства также требовали проверки, поверки, определенных условий применения и присутствия оператора, что ограничивало их применение. В последнее время в почвенно-физических исследованиях широко распространяются диэлькометрические методы (Calamita et al., 2012; Zhu et al., 2019), оптимально сочетающие точность и доступность измерения параметров.

На основе рассмотренных проблем измерения режимов почв был разработан и испытан прототип стационарной системы мониторинга режимов почв в составе т. н. интеллектуальных цифровых платформ, применяющих технологии “Интернета вещей”, искусственного интеллекта и больших данных. Такие платформы являются составной частью цифровых двойников (Кирюшин, 2011; Иванов и др., 2025), способны генерировать новые знания на базе поступающих и уже имеющихся данных, а также предлагать решения. В этом отношении цифровой двойник можно рассматривать как фундаментальный компонент стратегии управления с обратной связью. Виртуальное представление достигается путем моделирования процессов, происходящих в физическом объекте (почве), с использованием математических моделей и автоматической загрузкой больших объемов экспериментальных данных, получаемых в реальном времени с помощью систем сбора данных.

Цель данной работы: разработка и испытание прототипа стационарной системы мониторинга режимов почв.

Задачи:

1) Экспериментально обосновать в полевых условиях использование диэлькометрических датчиков влажности почвы и датчиков уровня грунтовых вод.

2) Установить датчики для наблюдений за послойной динамикой влажности, температуры почвы и уровня грунтовых вод, их дистанционное получение и передачу к пользователю на основе “облачных” технологий (создание функционального прототипа).

3) Обосновать методы представления и анализа динамических данных о режимах влажности и температуры почвы, соответствующие новым возможностям наблюдений и формам получения экспериментальных данных.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводились на Опытном поле ВНИИМЗ (Тверская область, пос. Эммаусс) на агродерново-подзолистых оглеенных легкосуглинистых почвах (по WRB – Albic Retisol), сформированных на краевой морене. Морфология, свойства, топографическое положение и особенности использования этих почв приведены в нашей ранней работе (Шеин и др., 2022). Почвы

осушены гончарным дренажем на глубине 100–110 см при межд-
ренном расстоянии 30 м. Подстилающая порода – суглинистая
морена, залегающая на глубине 50–110 см.

По данным метеонаблюдений, в 2023–2024 гг. был сформи-
рован высокий снежный покров, и в весенний период наблюда-
лось медленное таяние снега (что негативно сказалось на перези-
мовке озимых культур). Если высота снежного покрова в феврале
достигала 48.1 см, то в результате активного снеготаяния в марте
она составляла 22.1 см, а в апреле снежный покров уже отсутство-
вал. Максимальные дневные температуры в марте, апреле и мае
достигали +17, +23 и +29 °С, ночные соответственно – –13, –3, –
3 °С. Также в мае наблюдались поздние весенние заморозки, кото-
рые также оказали негативное влияние на развитие растений и
урожай озимых. Сумма осадков за 2024 г. составила 592 мм, в том
числе за апрель–сентябрь – 313 мм (53.9% от суммы за год). Агро-
климатические условия 2025 г. в течение вегетационного периода
отличались от среднеголетних показателей. В апреле склады-
вались благоприятные погодные условия для вегетации озимых
культур и многолетних трав. Температура воздуха на протяжении
двух последних декад превышала среднеголетние показатели
на 4 °С. Максимальные дневные температуры в марте, апреле и
мае достигали +15, +27 и +30 °С, ночные, соответственно – –8, –5,
–2 °С. В середине апреля визуально наблюдалась сильно и избы-
точно увлажненная поверхность почвы в результате таяния снега
и выпадения осадков. В весенне-летний период наблюдалось из-
быточное количество осадков – в мае 122% от нормы, в июне в 2
раза выше нормы, а в отдельные декады превышение количества
осадков достигало 293–348%. По данным метеонаблюдений, сум-
ма осадков за 2025 г. составила 567 мм, в том числе за период ап-
рель–июнь – 240 мм (42.3%), а за апрель–сентябрь – 363 мм
(64.0%).

На северном пологом склоне водораздела агроландшафта
были установлены диэлькометрические датчики для определения
влажности на глубинах 10, 20, 30, 40, 60 и 100 см и датчики уров-
ня грунтовых вод (УГВ). В точке наблюдения в непосредственной
близости от датчиков был установлен логгер с модулем передачи
данных через интернет в “облачное хранилище”.

В основе диэлькометрических методов лежит зависимость диэлектрической проницаемости почвы от ее влажности. Электромагнитный импульс распространяется вдоль зондовых стержней (или в замкнутом контуре) со скоростью, обратно пропорциональной диэлектрической проницаемости среды. Время прохождения импульса (TDR) или частота колебаний (FDR) измеряются и преобразуются в значение объемной влажности почвы (Bogena et al., 2017; Ramos et al., 2018; Шеин и др., 2019).

Для создания функционального прототипа в качестве первичного преобразователя выбран датчик влажности и температуры (производство КНР), погружаемый на соответствующую глубину в почву, который может применяться при долгосрочном мониторинге данных параметров в режиме реального времени. Измерительная схема расположена в герметичном неразборном водонепроницаемом корпусе с тремя измерительными иглами-зондами из нержавеющей стали. Датчик имеет встроенный аналого-цифровой преобразователь и микроконтроллер управления, производящий вычисления значений влажности почвы и др., передающихся в логгер через цифровой интерфейс RS-485. Основные технические характеристики датчиков, заявленные производителем:

Диапазон измерения объемной влажности: 0–100%.

Погрешность измерения влажности: $\pm 2\%$ (0–50%), подтверждена нами в сравнении с термостатно-весовым способом с учетом плотности сложения почвы; $\pm 3\%$ (50–100%).

Объем почвы, в котором измеряется влажность: $\sim 300 \text{ см}^3$.

Разрешение: 0.03% (0–50%) и 1% (50–100%).

Время измерения: 1 с.

Принцип измерения: FDR ($\sim 100 \text{ МГц}$).

Диапазон измерения температуры: $-40 \dots 85 \text{ }^\circ\text{C}$.

Точность измерения температуры: $\pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ (разрешение $0.1 \text{ }^\circ\text{C}$).

Выход: Цифровой интерфейс RS-485 (протокол Modbus RTU).

Схема устройства дистанционного измерения и передачи данных изображена на рисунке 1.

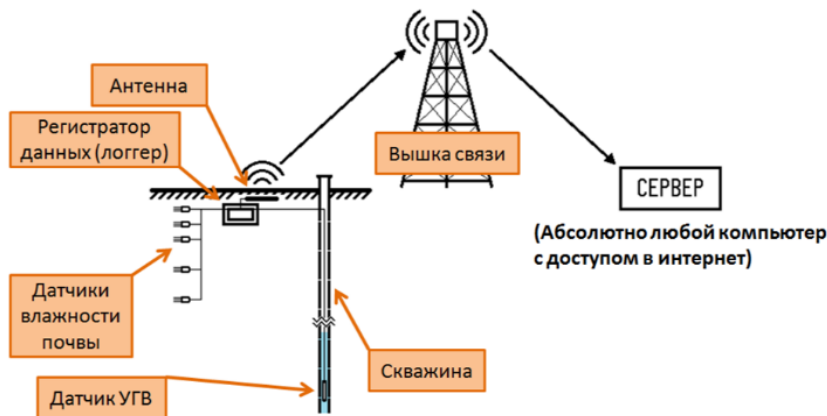


Рис. 1. Схема получения и передачи данных о влажности и температуре почвы через интернет.

Fig. 1. Scheme for receiving and transmitting data on soil moisture and temperature via the Internet.

Выбор интерфейса RS-485 обусловлен возможностью объединения нескольких датчиков в сеть по двухпроводной линии, что удобно для мониторинга почвенного профиля. Адреса устройств в сети настраиваются в диапазоне 1–250.

Для передачи данных через Интернет использовались GSM регистры данных, подключаемые к облачному сервису “Promodem Cloud” (ООО “Аналитик-ТС”, РФ). Функционал облачного сервиса включает: сбор и хранение данных с приборов, отображение информации в виде графиков и таблиц, экспорт массива данных (например, в Excel, txt, cvs) и отображение местоположения приборов на карте.

Переданная регистраторами информация размещается в базе данных, структура которой представлена многомерным кубом и имеет три пространственных уровня: модем – датчик – регистр. В авторском варианте к одному модему подключается до 10 датчиков, каждый из которых содержит несколько десятков регистров. В регистрах отображаются измеряемые параметры и их настройка, включающая калибровочные константы, диапазон измерений, тек-

стуру почвы и номер датчика. Наиболее важными калибровочными константами является текстура почвы: 0 – mineral soil; 1 – sandy soil; 2 – clay; 3 – organic soil. В данной работе применено значение по умолчанию – 0. Как правило, физически измеряются электрические параметры, пропорциональные диэлектрической проницаемости, электропроводности и температуре почвы. Далее на их основе датчик рассчитывает влажность почвы, общее содержание солей и др. В данном исследовании, ввиду отсутствия засоления агродерново-подзолистых почв опытного поля, данные по ЕС не приводятся, но в аридных условиях такие данные могут представлять большую практическую значимость при оценке засоления, расчете промывных норм и т. д. Также были протестированы датчики, измеряющие pH и содержание NPK почвы, но качество полученных данных недостаточно для применения их на практике. Учитывая, что датчики и логгеры можно устанавливать в различных частях агроландшафта, кроме пространственного уровня база данных содержит информацию о времени измерения. При этом время выборки (частота дискретизации) изменяется пользователем и составляет 1 сек. и более.

С помощью описанного выше устройства были получены послойные данные о влажности почвы, а для оценки водного режима почв, т. е. состояния и движения влаги в почве и ее доступности для растений, использовались послойные значения почвенно-гидрологических констант (ПГК): наименьшая влагоемкость (НВ), влажность завядания (ВЗ), максимальная гигроскопичность (МГ). ПГК были рассчитаны по методу секущих Воронина (Воронин, 1986) из основных гидрофизических характеристик (ОГХ), полученных комбинированным методом (капилляриметрия до pF 2.81 и над насыщенными растворами солей в диапазоне pF 2.81–4.20) (Вадюнина, Корчагина, 1986).

Образцы на плотность сложения отбирались классическим буровым методом Качинского. Гранулометрический состав определялся методом лазерной дифрактометрии с предварительной обработкой ультразвуком. Более подробно методика определения описана в работе по исследованию особенностей гранулометрического состава почвенного покрова опытного поля (Шеин и др., 2022).

Динамические данные о послойной влажности, полученные через Интернет, обрабатывались с использованием программы Golden Software Surfer для построения карт хроноизоплет влажности. На эти карты наносились значения ПГК для оценки фаз водного режима (гравитационный сток, легкодоступная влага, недоступная влага).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

По данным полевых и лабораторных исследований в понижении северной части водораздела, в месте установки измерительной системы, были определены некоторые водно-физические свойства агродерново-подзолистой почвы, приведенные в таблице 1.

Профиль исследуемой почвы отчетливо разделяется на три слоя по гранулометрическому составу и соответственно по гидрофизическим свойствам, как видно из таблицы 1. Гранулометрический состав показал преобладание мелкозернистого песка по всему профилю с пиком 70–100 мкм. Верхний слой (0–30 см) сложен средним суглинком, который сменяется на глубине 30–50 опесчаным суглинком и затем с 50 см – надморенным средним суглинком.

В результате непрерывных дистанционных наблюдений с 15 июля 2024 г. по 15 июля 2025 г. с суточным интервалом был получен обширный массив данных о динамике объемной влажности и температуры в почвенном профиле, а также об уровне грунтовых вод. Измерение проводилось в одно и то же время суток для исключения влияния суточных температур почвы. Эти данные послужили основой для построения карт хроноизоплет влажности и температуры почвы (рис. 2). В верхней части рисунка 2 (а, б) представлены также данные по осадкам и температуре воздуха из архива погоды Тверской метеостанции. Хроноизоплеты наглядно отображают пространственно-временное распределение влажности и температуры по профилю.

Таблица 1. Некоторые водно-физические свойства агродерновой почвы
Table 1. Some water-physical properties of agroturf soil

Глубина, см	Содержание физ. глины, %	Содержание фракций, %			Название		Плотность почвы, г/см ³	ПГК, % (массовые)		
		Clay (<2 мкм)	Silt (2–50 мкм)	Sand (50–2 000 мкм)	по Качинскому	по USDA		НВ	ВЗ	МГ
0–10	31.59	7.41	55.46	37.13	суглинок средний	пылеватый суглинок	1.07	23.0	7.7	5.7
10–20	32.08	7.84	54.2	37.95	суглинок средний	пылеватый суглинок	1.27	20.2	6.7	5.0
20–30	24.97	6.53	49.26	44.21	суглинок легкий	суглинок	1.15	17.0	5.3	4.1
30–40	15.64	4.42	41.83	53.75	супесь	опесчаный суглинок	1.54	13.7	3.2	2.3
40–50	16.15	5.25	33.3	61.46	супесь	опесчаный суглинок	1.75	11.5	3.6	2.9
50–60	33.41	10.17	48.61	41.22	суглинок средний	суглинок	1.71	15.7	6.6	5.4

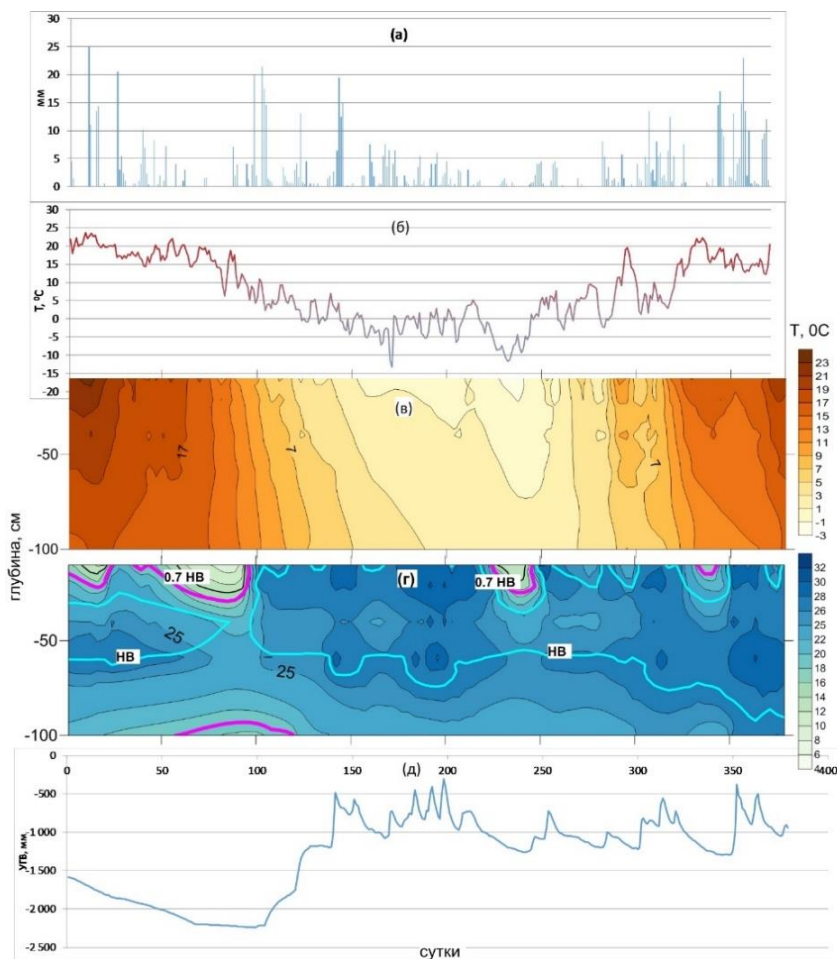


Рис. 2. (а) – осадки, (б) – температура воздуха, (в) – хроноизоплеты температуры, (г) – объемной влажности, (д) – уровень грунтовых вод агродерново-подзолистой почвы (Опытное поле ВНИИМЗ) за период 15.07.2024–15.07.2025. **Примечание:** на хроноизоплетах влажности нанесены почвенно-гидрологические константы (НВ – наименьшая влагоемкость, 0.7НВ).

Fig. 2. (а) – precipitation, (б) – air temperature, (в) – temperature chronopleths, (г) – volumetric moisture content, (д) – groundwater level of agrosod-podzolic soil (VNIIMZ experimental field) for the period 15.07.2024–

15.07.2025. **Note:** Soil-hydrological constants (HV – least moisture capacity, 0.7HV) are plotted on the moisture chrono-isopleths.

Анализ полученных хроноизоплет в комплексе с нанесенными значениями ПГК позволил детально охарактеризовать водный режим исследуемой почвы и выявить критические периоды.

На графиках отчетливо видны периоды резкого изменения влажности во всем профиле, связанные в основном с интенсивными осадками. Особенно четко выражены периоды стремительного увлажнения почвенной толщи в конце октября – начале ноября (формирование осенних запасов влаги) и иссушения в конце сентября – начале октября. Период в конце апреля также характеризуется значительными изменениями влажности, связанными с началом снеготаяния и вегетации. По хроноизоплетам температуры почвы также наблюдается резкое снижение температуры осенью (конец октября – ноябрь) и ее повышение весной (апрель) – периоды, определяющие сроки проведения агротехнических мероприятий (закрытие влаги, посев).

Анализ хроноизоплет влажности позволил выделить основные фазы водного режима. По ним видно, что практически на протяжении всего исследуемого периода в верхних слоях (20–60 см) присутствует гравитационный сток (влажность > HV), особенно после сильных дождей осенью и весной. Зоны легкодоступной влаги (HV – 0.7HV) отмечаются в летний период в верхних слоях корнеобитаемого слоя и частично в нижних при снижении УГВ. Зоны недоступной влаги (< BЗ) зафиксированы не были.

Карты хроноизоплет с нанесенными ПГК являются ключевым документом для характеристики водного режима, оценки длительности и глубины проявления его критических фаз (гравитационный сток, дефицит влаги), что необходимо для планирования дренажа, орошения и других мелиоративных мероприятий (Выржиковский, Кузьмичев, 1968; Добровольский, Никитин, 1990).

Преимущества предложенного подхода и устройства дистанционного измерения влажности и температуры, регулярность и синхронность измерений позволит установить количественные связи между метеорологическими условиями (осадки, температура

воздуха) и динамикой влажности/температуры в почвенном профиле, что является необходимой информацией для верификации математических моделей.

Непрерывный мониторинг с относительно высоким временным разрешением (сутки, с возможностью уменьшения интервала) позволил зафиксировать короткие, но важные периоды резкого изменения свойств (увлажнение/иссушение, промерзание/оттаивание), которые легко пропустить при традиционных редких и затратных измерениях. Приведем примеры из проведенного эксперимента: кратковременное увлажнение пахотного горизонта после снеготаяния (период с 250-го по 270-ый, с 280-го по 300-й день); промачивание всего почвенного профиля до грунтовых вод (период с 300-го по 320-ый день); 5–10-дневные моменты переувлажнения пахотного горизонта в 150-й, 250-й, 320-й дни; закономерное периодическое, в данном случае импульсное, подтягивание грунтовых вод в холодный период.

Регулярное получение идентичных по формату данных с разных участков или глубин создает основу для строгого статистического сравнения их водного и температурного режимов (например, с использованием критерия Стьюдента), что актуально для выделения зон с разной влагообеспеченностью в агроландшафте.

Предложенный метод дистанционного измерения влажности и температуры почв стимулирует развитие подходов к анализу данных. С его помощью можно идентифицировать и более детально изучить “критические периоды” с возможным изменением частоты опроса датчиков.

Появляется возможность пространственно-статистического анализа водных режимов почв и гидрофизических свойств на основе обратной задачи в сложном почвенном покрове.

Не до конца решен вопрос о влиянии инструментальной точности измеряемых параметров на режимы, учитывая неоднородность почв по гранулометрическому составу, что потребует дальнейших методических исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан и апробирован функциональный прототип си-

стемы сбора и дистанционной передачи данных о послойной влажности, температуре почвы и уровне грунтовых вод с использованием диэлькометрических датчиков и облачных технологий.

Получен массив непрерывных данных с суточным интервалом за период июнь 2024 г. – апрель 2025 г. На основе этих данных построены характеристические карты хроноизоплет влажности и температуры, что обеспечило наглядное представление пространственно-временной динамики гидротермического режима исследуемой агродерново-подзолистой почвы.

Использование почвенно-гидрологических констант, нанесенных на хроноизоплеты влажности, позволило детально проанализировать водный режим почвы, выделить периоды гравитационного стока, легкодоступной и недоступной влаги, а также выявить критические периоды резкого изменения влажности (конец сентября – начало октября, конец октября – начало ноября, конец апреля) и температуры (конец октября – ноябрь, апрель) во всем профиле.

Ключевым преимуществом предложенного подхода является возможность синхронного получения информации в различных точках агроландшафта с ее дистанционной передачей, что позволяет: 1) устанавливать количественные соответствия между метеоусловиями и почвенными режимами; 2) надежно фиксировать короткие, но агрономически значимые критические периоды резкого изменения влажности и температуры; 3) проводить статистическое сравнение водных режимов разных почв или почвенных слоев; 4) оперативно использовать почвенные данные для управления мелиоративными процессами и прогнозирования критических периодов.

Применение данного подхода открывает новые возможности для анализа данных, включая фокусировку на критических периодах, пространственно-статистическую оценку режимов в сложном покрове и уточнение стратегий калибровки датчиков в зависимости от решаемых задач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Архангельская Т.А.* Параметры зависимости температуропроводности минеральных почв от влажности для различных текстурных классов // Почвоведение. 2020. № 1. С. 44–55.
2. *Болдырев А.Г.* Физические свойства почв как теоретическая основа прогноза их уплотнения // Влияние сельскохозяйственной техники на почву. М.: Наука, 1981. С. 80–85.
3. *Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А.* Методы исследования физических свойств почв. М.: Агропромиздат, 1986. 416 с.
4. *Воронин А.Д.* Основы физики почв. М.: Изд-во Моск.ун-та, 1986. 244 с.
5. *Выржиковский Л.В., Кузьмичев Д.С.* Определение влажности торфа емкостным влагомером // Мелиорация и использование осушенных земель. Минск: Урожай, 1968. Т. XVI.
6. *Димо В.Н.* Тепловой режим почв СССР. М., 1972. 359 с.
7. *Дмитриев Е.А.* Математическая статистика в почвоведении. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1972. 292 с.
8. *Добровольский Г.В., Никитин Е.Д.* Функции почв в биосфере и экосистемах. М.: Наука, 1990. 259 с.
9. *Емельянов В.А., Маслов В.П.* Пространственно-временная изменчивость плотности почвы на орошаемых землях // Докл. ВАСХНИЛ. 1985. № 5. С. 8–10.
10. *Зайдельман Ф.Р.* Гидрологический режим почв Нечерноземной зоны. Генетические, агрономические и мелиоративные аспекты. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 328 с.
11. *Зайдельман Ф.Р.* Мелиорация почв. М.: Изд-во МГУ, 1996. 382 с.
12. *Иванов А.Л., Болотов А.Г., Козлов Д.Н. и др.* Цифровые двойники почв как новый технологический уклад генетического и прикладного почвоведения // Почвоведение. 2025. № 6. С. 757–770.
13. *Кирюшин В.И.* Теория адаптивно-ландшафтного земледелия и проектирования агроландшафтов. М.: Колос, 2011. 443 с.
14. *Козловский Ф.И.* Современные естественные и антропогенные процессы эволюции почв. М.: Наука, 1991. 196 с.
15. *Полуэктов Р.А., Опарина И.В., Терлеев В.В.* Оперативный расчет и прогноз динамики почвенной влаги // Фундаментальные физические исследования в почвоведении и мелиорации. 2003. С. 241–244.
16. *Роде А.А.* К вопросу о “водно-физических константах” почвы // Почвоведение. 1961. № 6. С. 20.
17. *Роде А.А.* Методы изучения водного режима почв. М.: Изд-во АН СССР, 1960. 244 с.

18. Роде А.А. Почвенная влага. М.: Изд-во АН СССР, 1952. 445 с.
19. Теории и методы физики почв / Под ред. Е.В. Шеина и Л.О. Карпачевского. М.: Гриф и К, 2007. 616 с.
20. Шеин Е.В., Болотов А.Г., Умарова А.Б., Дембовецкий А.В., Гончаров В.М., Фаустова Е.В., Шнырев Н.А., Кокорева А.А. Руководство по использованию цифровых датчиков в режимных наблюдениях на полевой практике по физике почв. М.: ООО “Книжный дом университета”, 2019. 52 с.
21. Шеин Е.В., Иванов Д.А., Болотов А.Г., Дембовецкий А.В. Гранулометрический состав почв конечно-моренной гряды Верхневолжского постледникового района (Восточно-Европейская равнина, Тверская область) // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2022. Вып. 110. С. 5–21. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2022-110-5-21>.
22. Шестаков В.М., Поздняков С.П. Геогидрология. М.: ИКЦ “Академкнига”, 2003. 176 с.
23. Abdelal Q., Al-Kilani M.R., Al-Shishani G. Impact of soil particle size on soil moisture measurements through dielectric and electrical resistance properties // Eurasian Soil Science. 2025. Vol. 58(3). P. 32. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229324602270>.
24. Bogen H.R., Huisman J.A., Schilling B., Weuthen A., Vereecken H. Effective calibration of low-cost soil water content sensors // Sensors in Agriculture and Forestry. 2017. Vol. 17. P. 208. DOI: <https://doi.org/10.3390/s17010208>.
25. Calamita G., Brocca L., Perrone A., Piscitelli S., Lapenna V., Melone F., Moramarco T. Electrical resistivity and TDR methods for soil moisture estimation in central Italy test-sites // Journal of Hydrology. 2012. Vol. 454. P. 101–112. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.06.001>.
26. Evet S.R., Hang L.K., Motonet P., Nguyen M.L. Field estimation of soil water content: A practical guide to methods, instrumentation, and sensor technology, In: IAEA. Vienna, 2008. URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/TCS-30_web.pdf.
27. Gerke H.H., Vogel H.-J., Weber T.K.D., van der Meij W.M., Scholten T. 3–4D soil model as challenge for future soil research: Quantitative soil modeling based on the solid phase // Journal of Plant Nutrition and Soil Science. 2022. Vol. 185. P. 720–744. DOI: <https://doi.org/10.1002/jpln.202200239>.
28. Ramos Hernández J.G., Gracia-Sánchez J., Rodríguez-Martínez T.P., Zuñiga-Morales J.A. Correlation between TDR and FDR soil moisture measurements at different scales to establish water availability at the south of the Yucatan Peninsula. Chapter 4. 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.81477>.

29. Kodikara J., Rajeev P., Chan D., Gallage C. Soil moisture monitoring at the field scale using neutron probe // *Canadian Geotechnical Journal*. 2014. Vol. 51(3). P. 332–345. DOI: <https://doi.org/10.1139/cgj-2012-0113>.
30. Nieberding F., Huisman J.A., Huebner C., Schilling B., Weuthen A., Bogena H.R. Evaluation of three soil moisture profile sensors using laboratory and field experiments // *Sensors*. 2023. Vol. 23(14). P. 6581. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23146581>.
31. Singh J., Heeren D.M., Rudnick D.R., Woldt W.E., Bai G., Ge Y., Luck J.D. Soil structure and texture effects on the precision of soil water content measurements with a capacitance-based electromagnetic sensor // *Transactions of the ASABE*. 2020. Vol. 63(1). P. 141–152. DOI: <https://doi.org/10.13031/trans.13496>.
32. Zhu Y., Irmak S., Jhala A.J., Vuran M.C., Diotto A. Time-domain and frequency-domain reflectometry type soil moisture sensor performance and soil temperature effects in fine-and coarse-textured soils // *Applied Engineering in Agriculture*. 2019. Vol. 35(2). P. 117–134. DOI: <https://doi.org/10.13031/aea.12908>.

REFERENCES

1. Arkhangelskaya T.A., Parameters of the thermal diffusivity versus water content function for mineral soils of different textural classes, *Eurasian Soil Science*, 2020, Vol. 53 (1), pp. 39-49.
2. Boldyrev A.G., Physical properties of soils as a theoretical basis for predicting their compaction, In: *The influence of agricultural machinery on the soil*, Moscow: Science, 1981, pp. 80–85. (In Russ.)
3. Vadyunina A.F., Korchagina Z.A., *Methods for studying the physical properties of soils*, Moscow: Agropromizdat, 1986, 416 p. (In Russ.)
4. Voronin A.D., Fundamentals of soil physics, Moscow: Moscow University Publishing House, 1986, 244 p. (In Russ.)
5. Vyrzhikovskiy L.V., Kuzmichev D.S., Determination of peat moisture content with a capacitive moisture meter, In: *Reclamation and use of drained lands*, Minsk: Urozhai, 1968, Vol. XVI. (In Russ.)
6. Dimo V.N. Thermal regime of soils of the USSR, Moscow, 1972, 359 p. (In Russ.)
7. Dmitriev E.A., Mathematical statistics in soil science, Moscow: Moscow University Publishing House, 1972, 292 p. (In Russ.)
8. Dobrovolsky G.V., Nikitin E.D., *Soil functions in the biosphere and ecosystems*, Moscow: Nauka, 1990, 259 p. (In Russ.)

9. Emelianov V.A., Maslov V.P., Spatio-temporal variability of soil density on irrigated lands, *Reports of the All-Union Academy of Agricultural Sciences*, 1985, No. 5, pp. 8–10. (In Russ.)
10. Zaidelman F.R., *Hydrological regime of soils of the Non-Chernozem Zone. Genetic, Agronomic, and Ameliorative Aspects*, Leningrad: Gidrometeoizdat, 1985, 328 p. (In Russ.)
11. Zaidelman F.R., *Soil melioration*, Moscow: Moscow State University Publishing House, 1996, 382 p. (In Russ.)
12. Ivanov A.L., Bolotov A.G., Kozlov D.N., Vasilyeva N.A., Vladimirov A.A., Vasiliev T.A., Khorosheva L.O., Dukhanin Yu.A., Digital twins of soils as a new technological paradigm in genetic and applied soil science, *Eurasian Soil Science*, 2025, Vol. 58, No. 6, pp. 1–12.
13. Kiryushin V.I., *Theory of adaptive-landscape agriculture and design of agricultural landscapes*, Moscow: Kolos, 2011, 443 p. (In Russ.)
14. Kozlovsky F.I., *Modern natural and anthropogenic processes of soil evolution*, Moscow: Nauka, 1991, 196 p. (In Russ.)
15. Poluektov R.A., Oparina I.V., Terleev V.V., Operational calculation and forecast of soil moisture dynamics, *Proc. Conf. Fundamental physical research in soil science and land reclamation*, 2003, pp. 241–244.
16. Rode A.A., On the issue of “water-physical constants” of soil, *Eurasian Soil Science*, 1961, No. 6, pp. 20. (In Russ.)
17. Rode A.A., *Methods for studying the water regime of soils*, Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1960, 244 p. (In Russ.)
18. Rode A.A., *Soil moisture*, Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1952, 445 p. (In Russ.)
19. Shein E.V., Karpachevsky L.O., Theories and methods of soil physics, Moscow: Grif i K, 2007, 616 p. (In Russ.)
20. Shein E.V., Bolotov A.G., Umarova A.B., Dembovetsky A.V., Goncharov V.M., Faustova E.V., Shnyrev N.A., Kokoreva A.A., Guide to the use of digital sensors in field observations on soil physics, Moscow: ООО “Knizhnyy Dom Universitet”, 2019, 52 p.
21. Shein E.V., Ivanov D.A., Bolotov A.G., Dembovetskiy A.V., Granulometric composition of the finite moraine ridge soils of the Upper Volga postglacial region (East European plain, Tver region), *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2022, Vol. 110, pp. 5–21, DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2022-110-5-21>. (In Russ.)
22. Shestakov V.M., Pozdnyakov S.P., *Geohydrology*, Moscow: ITC “Akademkniga”, 2003, 176 p. (In Russ.)
23. Abdelal Q., Al-Kilani M.R., Al-Shishani G., Impact of soil particle size on soil moisture measurements through dielectric and electrical resistance

- properties, *Eurasian Soil Science*, 2025, Vol. 58(3), pp. 32, DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229324602270>.
24. Bogen H.R., Huisman J.A., Schilling B., Weuthen A., Vereecken H., Effective calibration of low-cost soil water content sensors, *Sensors in Agriculture and Forestry*, 2017, Vol. 17, pp. 208, DOI: <https://doi.org/10.3390/s17010208>.
25. Calamita G., Brocca L., Perrone A., Piscitelli S., Lapenna V., Melone F., Moramarco T., Electrical resistivity and TDR methods for soil moisture estimation in central Italy test-sites, *Journal of Hydrology*, 2012, Vol. 454, pp. 101–112, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.06.001>.
26. Evet S.R., Hang L.K., Motonet P., Nguyen M.L., Field estimation of soil water content: A practical guide to methods, instrumentation, and sensor technology, In: IAEA, Vienna, 2008, URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/TCS-30_web.pdf.
27. Gerke H.H., Vogel H.-J., Weber T.K.D., van der Meij W.M., Scholten T., 3–4D soil model as challenge for future soil research: Quantitative soil modeling based on the solid phase, *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2022, Vol. 185, pp. 720–744, DOI: <https://doi.org/10.1002/jpln.202200239>.
28. Ramos Hernández J.G., Gracia-Sánchez J., Rodríguez-Martínez T.P., Zuñiga-Morales J.A., Correlation between TDR and FDR soil moisture measurements at different scales to establish water availability at the south of the Yucatan Peninsula, Chapter 4, 2018, DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.81477>.
29. Kodikara J., Rajeev P., Chan D., Gallage C., Soil moisture monitoring at the field scale using neutron probe, *Canadian Geotechnical Journal*, 2014, Vol. 51(3), pp. 332–345, DOI: <https://doi.org/10.1139/cgj-2012-0113>.
30. Nieberding F., Huisman J.A., Huebner C., Schilling B., Weuthen A., Bogen H.R., Evaluation of three soil moisture profile sensors using laboratory and field experiments, *Sensors*, 2023, Vol. 23(14), pp. 6581, DOI: <https://doi.org/10.3390/s23146581>.
31. Singh J., Heeren D.M., Rudnick D.R., Woldt W.E., Bai G., Ge Y., Luck J.D., Soil structure and texture effects on the precision of soil water content measurements with a capacitance-based electromagnetic sensor, *Transactions of the ASABE*, 2020, Vol. 63(1), pp. 141–152, DOI: <https://doi.org/10.13031/trans.13496>.
32. Zhu Y., Irmak S., Jhala A.J., Vuran M.C., Diotto A., Time-domain and frequency-domain reflectometry type soil moisture sensor performance and soil temperature effects in fine-and coarse-textured soils, *Applied Engineering in Agriculture*, 2019, Vol. 35(2), pp. 117–134, DOI: <https://doi.org/10.13031/aea.12908>.

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2026-128-26-49



Ссылки для цитирования:

Савин И.Ю., Гафурова Л.А., Джалилова Г.Т., Романовская А.Ю. Изменения в почвенном покрове горных районов Узбекистана за период с 1980-х по 2020-е годы, выявленные по спутниковым данным Landsat // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2026. Вып. 128. С. 26-49. DOI: 10.19047/0136-1694-2026-128-26-49

Cite this article as:

Savin I.Yu., Gafurova L.A., Djalilova G.T., Romanovskaya A.Yu. Soil cover of mountainous regions of Uzbekistan changes from 1980-ies to 2020-ies detected by Landsat images, Dokuchaev Soil Bulletin, 2026, V. 128, pp. 26-49, DOI: 10.19047/0136-1694-2026-128-26-49

Благодарность:

Исследования выполнены в рамках выполнения темы НИР по Госзаданию FGUR-2025-0003 (125042105327-8) 4.

Acknowledgments:

The studies were carried out within the framework of State assignment No. FGUR-2025-0003 (125042105327-8) 4.

Изменения в почвенном покрове горных районов Узбекистана за период с 1980-х по 2020-е годы, выявленные по спутниковым данным Landsat

© 2026 г. И. Ю. Савин^{1,2*}, Л. А. Гафурова^{3**},
Г. Т. Джалилова³, 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/0000-0001-9434-3095>.

²Институт экологии РУДН, Россия,
115093, Москва, Подольское шоссе, 8, стр. 5.

³Национальный университет Узбекистана им. М. Улугбека, Узбекистан,
100174, Ташкент,

**<https://orcid.org/0000-0002-9760-3718>.

Поступила в редакцию 14.08.2025, после доработки 17.11.2025,
принята к публикации 29.04.2026

Резюме: Изменение почвенного покрова часто приводит к существенной трансформации функций почв, а в некоторых случаях к их полной потере и деградации почв, что существенно сказывается на качестве окружающей среды и сервисов почв. Все это предопределяет важность изучения процессов динамичности почв и почвенного покрова. Целью наших исследований было выявление тренда многолетней динамики почвенного покрова горных районов Узбекистана с 80-х годов прошлого века до 2020-х годов на основе анализа разновременных спутниковых данных. Анализ проведен для районов с абсолютной высотой более 900 м над уровнем моря на основе анализа спутниковых данных Landsat TM5 (29 сцен) за 1985–1987 гг. и Landsat 8 OLI (32 сцены) за 2021–2023 гг. На основе индивидуально определяемых для каждой сцены пороговых значений NDVI все изображения были разбиты на 3 класса наземного покрова: растительность, открытая поверхность почв и водная поверхность. После этого проводилось поканальное вычитание значений яркости в каждом канале за оба анализируемых периода съемки. Результаты были экспертно проинтерпретированы с точки зрения изменений почв. Полученная карта совмещалась с обновленной геoinформационной картой почвенного покрова горных районов республики. На 7% горных территорий Узбекистана за исследуемый период выявлены изменения почвенного покрова, связанные с процессами эрозии, осыпями, обвалами, вторичным переувлажнением и засолением почв. Для 4% территории исследований наблюдается тренд к проградации почв. Динамичность водной поверхности (затопление почв, освобождение почв от водной поверхности) на территории исследований наблюдается на 0.1–0.3% от площади гор. Проведенные исследования показали широкие возможности использования многолетних архивов спутниковых данных для оценки динамичности почв и почвенного покрова труднодоступных горных регионов Узбекистана.

Ключевые слова: мониторинг почвенного покрова; горные почвы; Узбекистан; Landsat; деградация почв.

Soil cover of mountainous regions of Uzbekistan changes from 1980-ies to 2020-ies detected by Landsat images

© 2026 I. Yu. Savin^{1,2*}, L. A. Gafurova^{3**},
G. T. Djalilova³, A. Yu. Romanovskaya^{1***}

¹*Federal 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/0000-0001-9434-3095>.

²*Environmental Engineering Institute of RUDN University,
5 Bld. 8 Podolskoye shosse, Moscow 115093, Russian Federation.*

³*National University of Uzbekistan named after Mirzo Ulugbek,
100174 Tashkent, the Republic of Uzbekistan,
**<https://orcid.org/0000-0002-9760-3718>.*

Received 14.08.2025, Revised 17.11.2025, Accepted 29.04.2026

Abstract: Soil cover changes often result in significant transformation of soil functions, and in some cases in their complete loss and soil degradation, which affects greatly the quality of the environmental conditions and soil services. Thus, studying the processes of soil and soil cover changes in dynamics is of greatest importance. The aim of the research was to identify the trend in long-term dynamics of soil cover in mountainous regions of Uzbekistan for the period from the 1980-ies to the 2020-ies through the analysis of multi-temporal satellite data. The analysis was carried out for regions of Uzbekistan with an absolute altitude of more than 900 meters above sea level. Soil cover changes were identified by means of the analysis of Landsat TM5 satellite data (29 scenes) for 1985–1987 period and Landsat 8 OLI (32 scenes) for 2021–2023 one. Based on the NDVI threshold values, individually determined for each scene, all images were divided into 3 land cover classes: vegetation cover, open soil surface and water surface. After that, channel-by-channel subtraction of the brightness values in each channel was carried out for both survey periods. The results were expertly interpreted in terms of soil changes. The developed map of soil cover changes was superposed over the updated geoinformation map of the soil cover of the mountainous regions of Uzbekistan. The main types of the found changes are associated with erosion processes, scree, rockfalls, secondary waterlogging and salinization of soils. These changes affect about 7% of the mountainous territory of the country for the period under study. A trend towards soil progradation is observed for 4% of the mountainous territory of Uzbekistan. Changes in the soil cover due to the dynamics of the water surface (flooding of soils, exposure of the soil surface after the water level in reservoirs has dropped or instead of intermittent water bodies) in the study area are observed on 0.1–0.3% of the mountain area. The conducted studies have shown the wide possibilities of using long-term archives of satellite data to assess the dynamics of soils and soil cover in hard-to-reach mountainous regions of Uzbekistan.

Keywords: soil cover monitoring; mountain soils; Uzbekistan; Landsat; soil degradation.

ВВЕДЕНИЕ

Почвенный покров любой территории динамичен. Его динамичность предопределяется как природными факторами (изменениями климата, геоморфологическими процессами, развитием растительности), так и направленным антропогенным воздействием. Характерное время изменений почвенного покрова может варьировать от часов (при антропогенном воздействии) до десятков и сотен лет (Керженцев, 2006). Изменения почвенного покрова часто приводят к существенной трансформации функций почв, а в некоторых случаях – к их полной потере и деградации почв, что существенно сказывается на качестве окружающей среды и сервисов почв. Все это предопределяет важность изучения процессов изменений почв и почвенного покрова и постоянный рост научных публикаций в этом направлении (Mauro, 2014).

Горные почвы обладают важными общебиосферными функциями. Труднодоступность и слабая пригодность для сельского хозяйства приводят к их меньшей изученности по сравнению с равнинными почвами. Но одновременно они являются менее устойчивыми к процессам деградации, что приводит к большей динамичности почвенного покрова гор (Shermanov, 2025).

В последние годы для изучения динамичности почвенного покрова все чаще используются спутниковые данные (Chen et al., 2025). Существующие архивы спутниковых данных позволяют оценивать динамичность почвенного покрова за последние 30–40 лет. Особенно многообещающим выглядит использование архивов многолетних спутниковых данных для отслеживания динамичности почв труднодоступных горных регионов (Mammadov et al., 2021; Jombo et al., 2023).

В Республике Узбекистан горы занимают около 36 тыс. км², или 8.07% от площади всей страны (Гафурова и др., 2024). Горные почвы Узбекистана и особенно их почвенный покров до сих пор изучены недостаточно полно. Информация о почвенном покрове гор страны, полученная в результате локальных исследований (Назаров, 1987; Турсунов и др., 2009; Турабаева, 2011; Фахрутдинова, 2014; Джалилова, 2018; Алибоева, 2022), была обобщена в виде мелко и среднемасштабных почвенных карт. Обобщение в

наиболее крупном масштабе представлено в “Атласе почвенного покрова Республики Узбекистан” (Атлас..., 2010), где почвенные карты регионов страны представлены в масштабе от 1 : 350 000 до 1 : 2 500 000. В 2024 г. была сделана попытка обновления контурной части почвенных карт горных территорий Узбекистана, содержащихся в этом Атласе, по спутниковым данным Landsat OLI 8 (Гафурова и др., 2024).

Целью наших исследований было выявление изменений почвенного покрова горных районов Узбекистана с 80-х годов прошлого века до 2020-х годов на основе анализа разновременных спутниковых данных Landsat.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Анализ проведен для горных районов Узбекистана с абсолютной высотой более 900 м над уровнем моря (рис. 1).

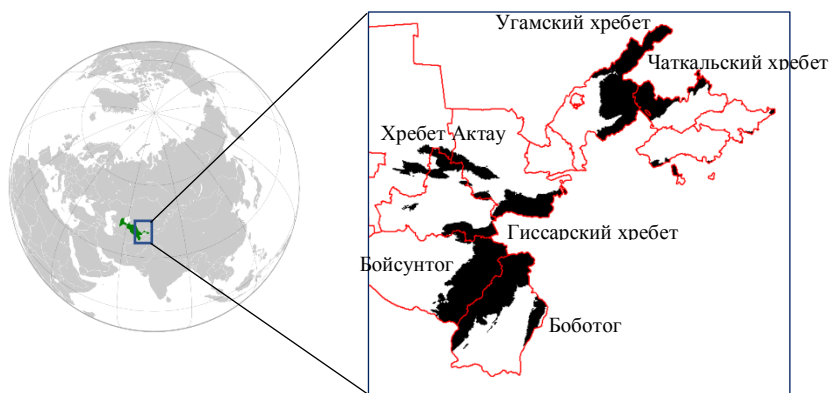


Рис. 1. Горные районы в восточной части Узбекистана (черный цвет – районы с абсолютной высотой более 900 м; красные линии – административные границы провинций страны).

Fig. 1. Mountainous regions of eastern part of Uzbekistan (black color – areas with an absolute altitude of more than 900 m; red lines – administrative boundaries).

Для данного региона характерно преобладание разнообразных почвообразующих пород: от элюво-делювия коренных пород различного состава до неогеновых глинистых и суглинистых отложений четвертичного возраста (Nabieva, 2008; Раупова, Абдуллаев, 2018).

Преобладает естественная растительность: от многолетников и ассоциаций эфирно-масличных растений в предгорьях и низкогорьях до горных лесов (туркестанский клен, алыча, яблоня, фисташники и миндаль, местами орех грецкий, береза, тополь, а также сумах, гранат, инжир, хурма), которые выше сменяются субальпийскими и альпийскими лугами и степями (Gafurova et al., 2020). В нижнюю часть горных массивов местами заходят пахотные угодья.

В почвенном покрове преобладают светло-бурые лугово-степные высокогорные почвы, местами в сочетании с болотно-луговыми и торфяно-болотными, бурые горно-лесные, коричневые почвы (в том числе карбонатные, слабо-карбонатные, выщелоченные, глубоковыщелоченные, типичные). Также широко представлены примитивные почвы галечников и песчано-галечниковых отложений, выходы коренных пород, осыпи (Атлас..., 2010; Гафурова и др., 2024). Практически все почвы каменистые, щебнистые и разные по мощности мелкоземистой толщи.

Широко развиты процессы эрозии и солифлюкции, которые формируют делювиальные и пролювиальные отложения в нижних частях склонов гор и в горных долинах.

Местами растительность и почвенный покров территории исследований нарушены в результате прокладки дорог, строительства и добычи полезных ископаемых.

В качестве основы для выявления изменений наземного покрова и почвенного покрова использовались безоблачные спутниковые данные Landsat TM5 за 1985–1987 гг. и Landsat 8 OLI за 2021–2023 гг. с пространственным разрешением 30 м на местности. В обоих случаях использован продукт второго уровня обработки после стандартной атмосферной коррекции и пересчета числовых значений в величины спектральной отражательной способности (COC). Для анализа были отобраны сцены, полученные в июне месяце, на пике вегетационного сезона. Анализировались

каналы съемки Landsat 8 OLI: 2 (0.45–0.52 мкм), 4 (0.63–0.68 мкм) и 5 (0.85–0.88 мкм); и Landsat 5 TM: 1 (0.45–0.52 мкм), 3 (0.63–0.69 мкм), 4 (0.76–0.90 мкм).

Последовательность анализа представлена на рисунке 2.

На первом этапе были определены основные объекты наземного покрова, которые можно было надежно дешифровать визуально по спутниковым данным Landsat на территории исследований. В их состав вошли следующие:

1. Густая растительность (ГР).
2. Разреженная растительность (РР).
3. Водная поверхность (ВП).
4. Открытая гумусированная поверхность почв (ПГ).
5. Открытая безгумусная поверхность почв (ПБ).
6. Открытая поверхность засоленных почв (ПЗ).
7. Открытая поверхность переувлажненных почв (ПП).

Выделение этих объектов вместо попытки дешифрирования конкретных почв было обусловлено недостаточностью данных полевых обследований для выявления дешифровочных признаков для осуществления подобного дешифрирования.

Для каждого типа объектов были определены их спектральные “портреты” в координатах используемых каналов съемки. Для этого по июньским изображениям 2021–2023 гг. визуально было отобрано не менее 30 пикселей для каждого типа объектов и посчитано среднее арифметическое значение коэффициента спектрального отражения в каждом анализируемом канале съемки, величина которого и использовалась для формирования спектрального портрета объекта.

На основе индивидуально определяемых для каждой анализируемой сцены пороговых значений NDVI изображения были разбиты на 3 класса наземного покрова: растительность, открытая поверхность почв и водная поверхность.



Рис. 2. Последовательность проведенного анализа.
Fig. 2. Flowchart of the performed analysis.

После этого было проведено поканальное вычитание значений СОС в соответствующих каналах Landsat 8 OLI и Landsat 5 TM:

$$D1 = OLI2 - TM1$$

$$D2 = OLI4 - TM3$$

$$D3 = OLI5 - TM4$$

где D_n – разница в спектральной яркости, OLI_n – соответствующий канал съемки Landsat 8 OLI, TM_n – соответствующий канал съемки Landsat 5 TM (n – номера соответствующих каналов съемки).

Для каждого изображения-разницы была построена гистограмма, по которой были определены границы преобладающего класса разницы отражения (по перепадам на графике гистограммы или путем отсечения 50% пикселей). Таким образом изображение-разница для каждого канала съемки было разбито на 3 класса: фоновое (близкое к 0) значение, ниже фонового и выше фонового. Фоновое значение кодировалось как отсутствие изменений в СОС, ниже фонового – как падение СОС, выше фонового – как рост СОС. После этого было сделано последовательное пересечение карт разниц $D1$ с $D2$ и далее с $D3$. В итоге была получена результирующая карта изменений СОС во всех анализируемых каналах съемки.

На следующем этапе анализа карта изменений СОС перекодировалась в термины перехода определенных выше объектов друг в друга. С этой целью анализировалось сходство классов на карте изменения отражения с классами попарной разницы в портретах между всеми определенными выше объектами, с учетом того, к какому классу наземного покрова относится объект.

Сначала на основе карты изменения СОС были выделены все переходы (изменения), связанные с водной поверхностью: переход ВП в растительность или в открытую поверхность почв, и наоборот, растительности и почв в водную поверхность. После этого в классе растительности на основе той же карты были определены переходы от густой растительности к разреженной, и наоборот. И далее аналогично: в классе открытой поверхности почв также были выделены подклассы переходов по гумусности,

засоленности и переувлажненности. Переходы были установлены путем совместного экспертного анализа классов наземного покрова с классами переходов (зафиксированных изменений). Например, если на карте 80-х годов пиксель был определен как растительность, а на карте изменения СОС он попадает в класс, для которого характерно падение и D1, и D2, и D3, то этот случай, с учетом разницы портретов СОС разных классов, интерпретировался как переход от растительности к водной поверхности.

Далее полученные классы переходов наземного покрова были интерпретированы в следующие классы изменений почвенного покрова:

1. Деградация почвенного покрова, связанная с деградацией растительности (переход класса ГР в РР).
2. Проградация почв (переход класса РР в класс ГР, или классов открытой поверхности почв в классы растительности).
3. Появление новых площадей почв в результате сокращения водных объектов (переход ВП в другие классы наземного покрова).
4. Затопление прибрежных почв в результате увеличения водной поверхности (другие классы наземного покрова в ВП).
5. Деградация почв в результате эрозии, оползневых, осыпных процессов (переход классов открытой поверхности почв в класс ПБ).
6. Увеличение доли засоленных почв или степени засоленности почв (переход классов открытой поверхности почв в класс ПЗ).
7. Увеличение доли переувлажненных почв или степени переувлажнения почв (переход классов открытой поверхности почв в класс ПП).

Полученная карта изменений почвенного покрова была совмещена с обновленной геоинформационной картой почвенного покрова горных районов Узбекистана (Гафурова и др., 2024) (далее ГПК), после чего был проведен экспертный анализ логичности выявленных изменений с учетом особенностей почвенного покро-

ва территории и окончательная коррекция карты изменений на основе анализа классов изменений СОС. Корректировались нелогичности на предварительной карте. Например, если высоко в горах на предварительной карте был установлен рост засоленности почв, то они перекодировались в деградацию почв в результате эрозии, оползней и т. д., так как наличие там сильно засоленных почв невозможно. Подобные нелогичности были исправлены экспертно на всей карте. Для всех 237 выделов карты почвенного покрова были посчитаны площади и доли наблюдаемых изменений от площади выделов.

Непосредственно анализ данных был выполнен с использованием пакета прикладных программ ГИС ILWIS v.3.3 (<https://www.itc.nl/ilwis/download/ilwis33/>).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты анализа визуализированы в виде рисунков 3–12.

Из примера карты на рисунках 3 и 12 следует, что во многих контурах ГПК встречаются пиксели с разными типами деградации. Контуров с полным отсутствием изменений почвенного покрова очень мало, но доля изменений от площади контуров ГПК, как правило, невелика. Абсолютно преобладают выделы, где доля изменений не превышает нескольких процентов (рис. 4). Больше всего изменений наблюдается на севере и северо-востоке территории, в районе Чаткальского и Угамского хребтов. Здесь во многих контурах до 10–20% почв имеют тренд к проградации из-за проградации растительности (рис. 6).

Такая же доля почв в контурах в этом районе освободилась от воды, и одновременно такая же доля почв во многих контурах перешла в малогумусные из-за процессов эрозии, осыпей и обвалов (рис. 7). Триггером всех этих процессов, скорее всего, является изменение климата (Мягкова, 2019). Основная часть наблюдаемых изменений в районе Чаткальского и Угамского хребтов приурочена к краевым частям горных массивов, где, помимо изменений климата, наибольшее воздействие на почвенный покров оказывает антропогенная деятельность.

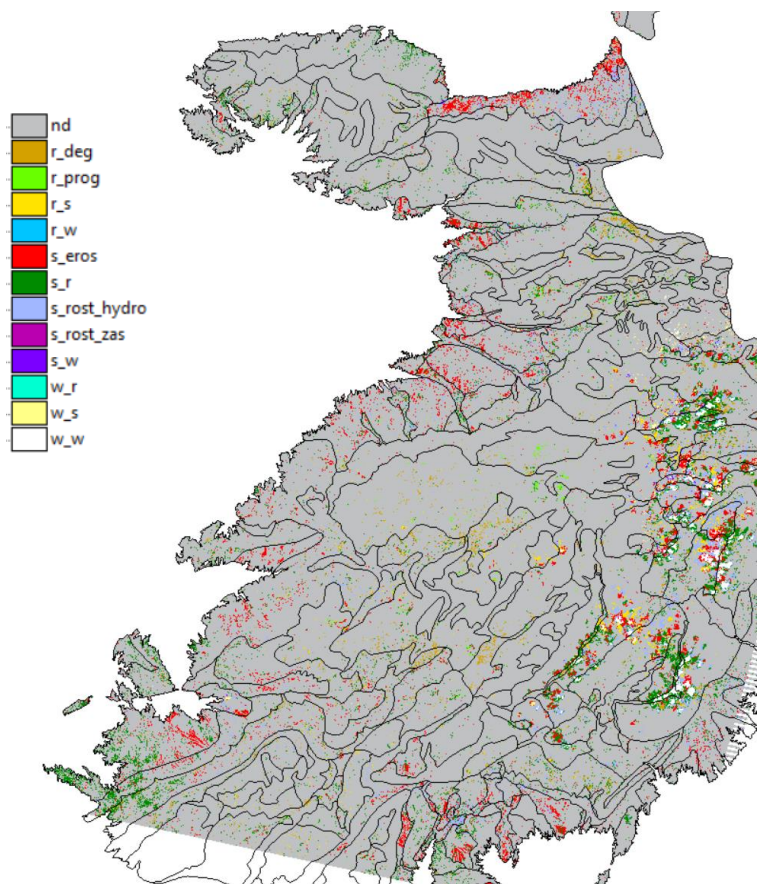


Рис. 3. Фрагмент карты изменений наземного покрова и почв части горного массива Бойсунтог (**nd** – нет изменений, **r_deg** – деградация растительности, **r_prog** – проградация растительности, **r_s** – переход растительности в открытую поверхность почв, **r_w** – переход растительности в водную поверхность, **s_eros** – потеря гумусного горизонта в результате эрозии, оползней, обвалов, **s_r** – переход открытой поверхности почв в класс “растительность”, **s_rost_hydro** – рост гидроморфности почв, **s_rost_zas** – рост засоленности почв, **s_w** – переход открытой поверхности почв в водную поверхность, **w_r** – переход водной поверхности в растительность, **w_s** – переход водной поверхности в открытую поверхность почв, **w_w** – водная поверхность без изменений, **черные линии** – границы выделов ГПК).

Fig. 3. A fragment of the land cover and soils changes map of the Boysuntog mountain range part (**nd** – no changes, **r_deg** – vegetation degradation, **r_prog** – vegetation progradation, **r_s** – transformation of the vegetation covered land surface to the open soil surface, **r_w** – transformation of the vegetation covered land surface into the water surface, **s_eros** – humus horizon loss resulting from erosion, landslides, avalanches, **s_r** – transformation of the open soil surface to the “vegetation” class, **s_rost_hydro** – increase in soil hydromorphism, **s_rost_zas** – increase in soil salinity, **s_w** – transformation of the open soil surface into the water surface, **w_r** – transformation of water surface into vegetation, **w_s** – transformation of the water surface to the open soil surface, **w_w** – no changes in water surface, **black lines** – boundaries of the units on the geoinformation map of the soil cover).

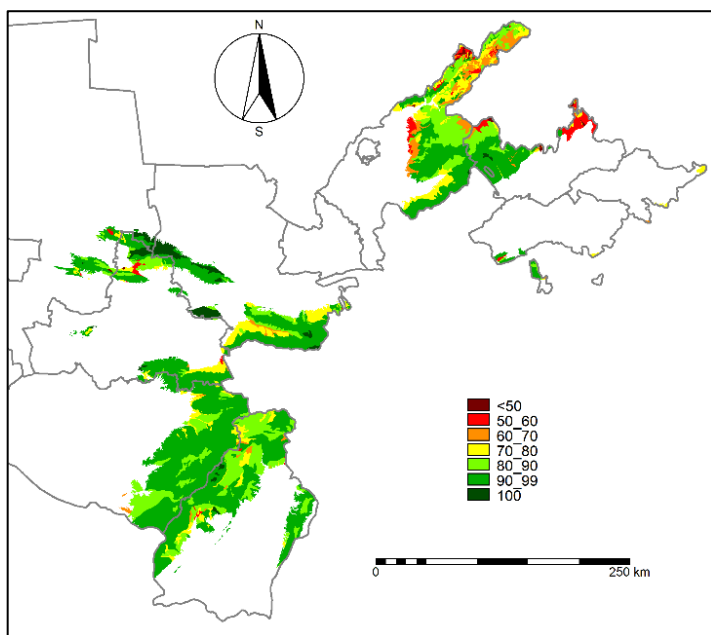


Рис. 4. Доля класса “отсутствие изменений” от выделов ГПК (Гафурова и др., 2024).

Fig. 4. The “no change” class share of the units of the soil cover geoinformation map (Gafurova et al., 2024).

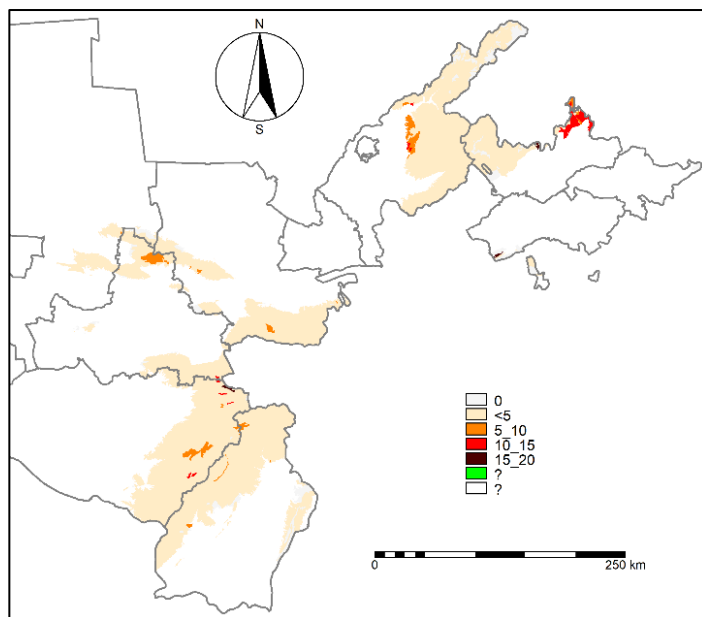


Рис. 5. Деградация почвенного покрова, связанная с деградацией растительности (здесь и далее – доля от выделов ГПК).

Fig. 5. Degradation of the soil cover associated with vegetation degradation (hereinafter – share of the units of the soil cover geoinformation map).

Самые небольшие по площади изменения установлены для горных почв хребта Актау (рис. 1). В краевых частях хребта местами отмечается рост площадей засоленных и переувлажненных почв, что обусловлено большей аридностью климата и использованием нижних частей склонов гор в орошаемом сельском хозяйстве (Турдалиев и др., 2019).

На отрогах Гиссарского хребта наблюдаются аналогичные закономерности, но доля выделов ГПК с отсутствием изменений и количество типов изменений здесь ниже, чем для территории хребта Актау.

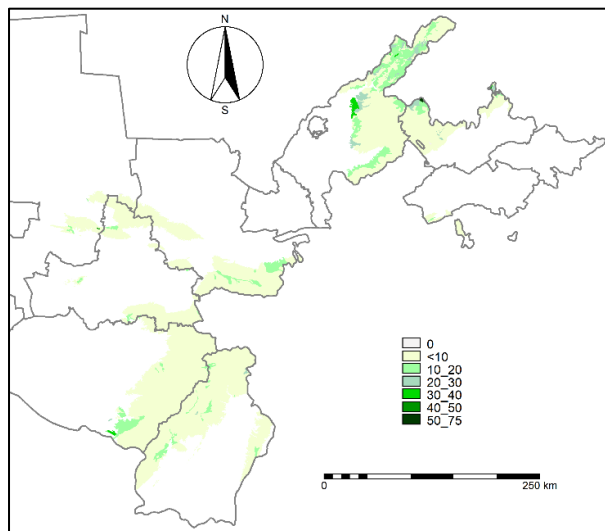


Рис. 6. Проградация почв.

Fig. 6. Soil progradation.

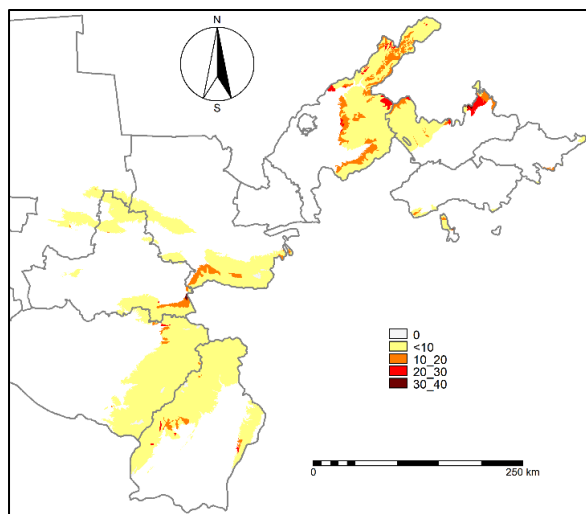


Рис. 7. Дegradация почв в результате эрозии, оползневых, осыпных процессов.

Fig. 7. Soil degradation resulting from erosion, landslides, and avalanches.

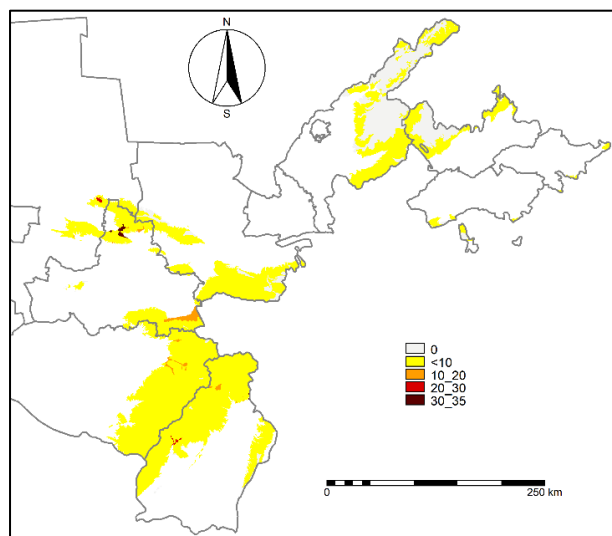


Рис. 8. Увеличение доли переувлажненных почв.

Fig. 8. Increase in the share of hydromorphic soils.

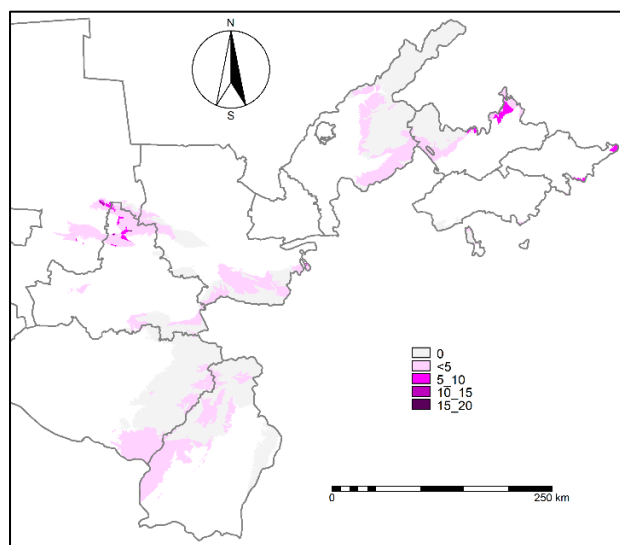


Рис. 9. Увеличение доли засоленных почв.

Fig. 9. Increase in the share of saline soils.

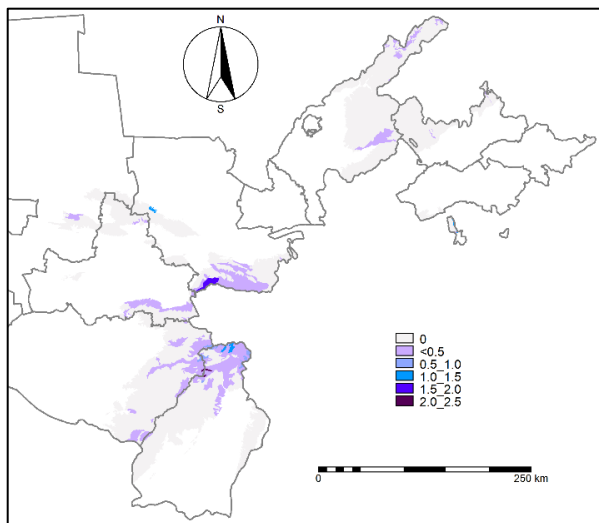


Рис. 10. Доля почв, перешедших под воду.

Fig. 10. The share of soils, which became covered with water.

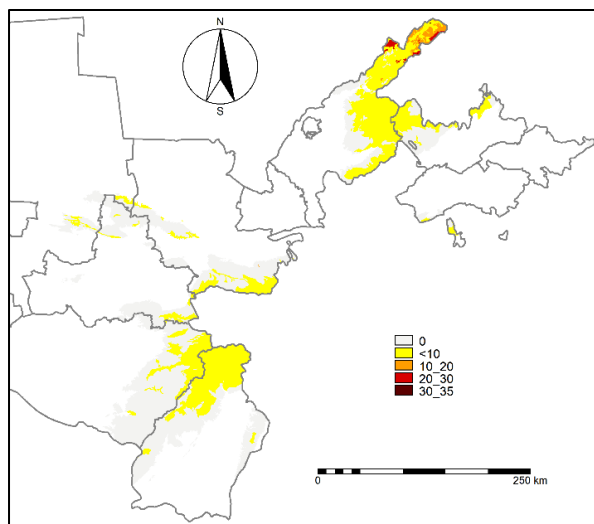


Рис. 11. Доля почв, освободившихся от воды.

Fig. 11. The share of soils, that emerged from under water.

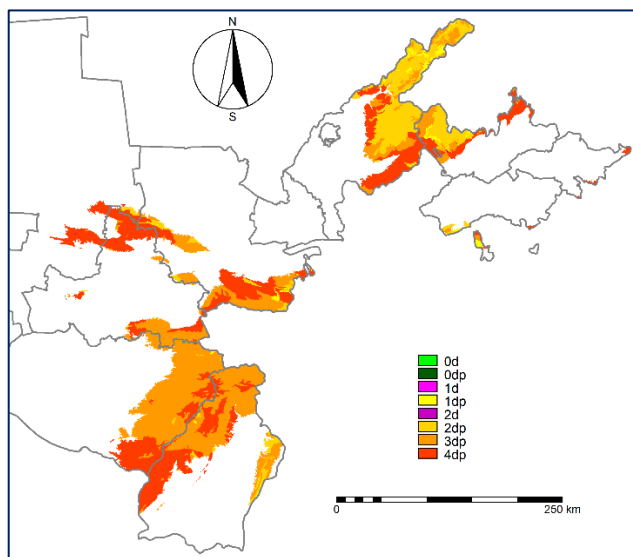


Рис. 12. Суммарная оценка изменений почвенного покрова (количество типов деградации в контуре ГПК (**nd** – от 0 до 4 типов) и присутствие пикселей с проградацией почв (**p**)).

Fig. 12. Total assessment of changes in the contour of the soil cover geoinformation map (number of degradation types in the soil-protective complex contour (**nd** – from 0 to 4 types) and presence of pixels with soil progradation (**p**)).

В целом для горных территорий Узбекистана выявленных изменений почвенного покрова за период с 80-х годов прошлого века по 20-е годы текущего оказалось около 11.31% от территории гор. Из них для 4.33% территории гор наблюдается тренд к проградации почв. На 4.45% территории гор наблюдаются процессы изменений почвенного покрова, связанные с эрозией, осыпями, обвалами, на 1.66% – наблюдаются процессы вторичного переувлажнения почв, а на 0.31% – процессы вторичного засоления почв. Изменения почвенного покрова в связи с динамикой водной поверхности (затопление почв, освобождение почв от водной поверхности) на территории исследований не превышают 0.1–0.3% от площади гор.

Таким образом, проведенные исследования показали широкие возможности использования многолетних архивов спутниковых данных для оценки динамичности почв и почвенного покрова труднодоступных горных регионов Узбекистана. По сути, был получен первый опыт подобных работ в стране, который в том числе вскрыл и недостатки данного подхода. К ним можно отнести трудность точного детектирования по спутниковым данным конкретных почв на территории исследований, что связано с недостаточной изученностью почвенно-ландшафтных связей. В результате методы спутникового мониторинга, основанные на сравнении результатов детектирования, полученных по изображениям разных лет съемки (Potarov et al., 2022), не позволяют корректно их соотнести друг с другом. Выделение более детальных классов почв и наземного покрова по спутниковым данным, как это сделано, например, в упоминаемой работе (Савин и др., 2014), также затруднено отсутствием исследований спектральной отражательной способности почв и растительности региона. Кроме того, в связи с генерализованностью изображения почвенного покрова на спутниковых данных (Иванов и др., 2025), не до конца изученным остается вопрос о том, что конкретно приводит к изменению спектральной яркости на снимках – изменение свойств почвы или изменение структуры почвенного покрова.

Несмотря на отмеченные выше недостатки, альтернативы развитию систем спутникового мониторинга почвенного покрова горных территорий страны на сегодняшний день нет.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе спутниковых данных Landsat 80-х годов прошлого века и 20-х годов нынешнего проведен анализ изменений почвенного покрова горных территорий Узбекистана. Результаты представлены в виде растрового слоя ГИС с размером пикселя 30 м на местности.

Основные типы выявленных изменений связаны с процессами эрозии, осыпями, обвалами, вторичным переувлажнением и засолением почв. Эти изменения затрагивают около 7% территории гор страны. Для 4.33% территории гор Узбекистана наблюдается тренд к проградации почв. Изменения почвенного покрова в

связи с динамикой водной поверхности (затопление почв, освобождение почв от водной поверхности) на территории исследований не превышают 0.1–0.3% от площади гор.

Проведенные исследования продемонстрировали широкие возможности использования многолетних архивов спутниковых данных для оценки динамичности почв и почвенного покрова труднодоступных горных регионов Узбекистана.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алибоева М.А., Жаббаров З.А., Фахрутдинова М.Ф. Влияние природных факторов на химические свойства горных почв (на примере почв Чаткальского государственного биосферного заповедника) // Научное обозрение. Биологические науки. 2022. № 1. С. 10–15. URL: <https://science-biology.ru/ru/article/view?id=1252>.
2. Атлас почвенного покрова Республики Узбекистан. Ташкент, 2010. 44 с.
3. Гафурова Л.А., Савин И.Ю., Джалилова Г.Т. Обновление почвенной карты горных районов Узбекистана // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2024. Вып. 118. С. 21–47. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2024-118-21-47>.
4. Джалилова Г.Т. Геоинформационный анализ эрозионных процессов в среднегорьях и низкогорьях Узбекистана (на примере почв Чаткальского и Туркестанского хребтов): Автореф. дис. ... докт. биол. наук. Ташкент, 2018. 53 с.
5. Иванов А.Л., Савин И.Ю., Прудникова Е.Ю., Воронин А.Я., Духанин Ю.А., Вернюк Ю.И. Дистанционные технологии ландшафтной адаптации земледелия. М.: ФИЦ “Почвенный институт им. В.В. Докучаева”, 2025. 141 с.
6. Керженцев А.С. Функциональная экология. М.: Наука, 2006. 259 с.
7. Мягкова Н.В. Экологические аспекты изменения климата в Узбекистане // Universum: технические науки. 2019. № 2(59). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ekologicheskie-aspekty-izmeneniya-klimata-v-uzbekistane>.
8. Назаров А.С. Почвы западных отрогов Чаткальского хребта (на примере почв Чаткальского горно-лесного государственного заповедника): Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Ташкент, 1987. 21 с.
9. Раупова Н.Б., Абдуллаев С.А. Горно-коричневые карбонатные почвы Западного Тянь-Шаня, их агрохимические свойства и гумусное состояние // Бюллетень науки и практики. 2018. № 2. С. 153–161.

10. *Савин И.Ю., Отаров А., Жоголев А.В., Ибраева М.А., Дуйсеков С.* Выявление многолетних изменений площади засоленных почв Шаульдерского орошаемого массива по космическим снимкам Landsat // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2014. Вып. 74. С. 49–65. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2014-74-49-65>.
11. *Турабаев А.* Описание некоторых природных факторов, сохраняющих разнообразие горных коричневых почв (на примере Чаткальских и Нуратинских гор): Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Ташкент, 2011. 27 с.
12. *Турдалиев Ж.М., Мансуров Ш.С., Ахмедов А.У., Абдурахмонов Н.Ю.* Засоленность почвогрунтов и грунтовых вод Ферганской долины // Научное обозрение. Биологические науки. 2019. № 2. С. 10–15. URL: <https://science-biology.ru/ru/article/view?id=1139>.
13. *Турсунов Л., Ханазаров А., Фахрутдинова М., Камилова Д.* Горные почвы Узбекистана. Ташкент: “Турон-Икбол”, 2009. 232 с.
14. *Фахрутдинова М.Ф.* Фракционный и групповой состав горно-коричневые выщелоченные почвы // Вестник НуУЗ. 2014. № 3/2. С. 79–82.
15. *Chen Q., Vaudour E., Richer-de-Forges A.C., Arrouays D.* Spectral indices in remote sensing of soil: definition, popularity, and issues. A critical overview // Remote Sensing of Environment. 2025. Vol. 329. 114918. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2025.114918>.
16. *Jombo S., Abd Elbasit M.A.M., Gumbo A.D., Nethengwe N.S.* Remote Sensing Application in Mountainous Environments: A Bibliographic Analysis // International journal of environmental research and public health. 2023. Vol. 20(4), 3538. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph20043538>.
17. *Gafurova L.A., Djalilova G.T., Ergasheva O.X., Kadirova D.A.* Measures on erosion-preventive forest melioration in mountain areas of Uzbekistan // Journal of Critical Reviews. 2020. No. 7(2). P. 283–287. DOI: <https://doi.org/10.31838/jcr.07.02.52>.
18. *Mammadov E., Nowosad J., Glaesser C.* Estimation and mapping of surface soil properties in the Caucasus Mountains, Azerbaijan using high-resolution remote sensing data // Geoderma Regional. Vol. 26. 2021. e00411. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2021.e00411>.
19. *Mauro S.E.D.* Soil Degradation: Overview and Critique // In: Ecology, Soils, and the Left. Environmental Politics and Theory. New York: Palgrave Macmillan, 2014. DOI: https://doi.org/10.1057/9781137350138_4.
20. *Nabieva G.M.* Soils of the western spurs of the Chatkal ridge and their enzymatic activity. Tashkent: NUU, 2008. 132 p.
21. *Potapov P., Hansen M.C., Pickens A., Hernandez-Serna A., Tyukavina A., Turubanova S., Zalles V., Li X., Khan A., Stolle F., Harris N., Song X.,*

Baggett A., Kommareddy I., Kommareddy A. The Global 2000-2020 Land cover and land use change dataset derived from the Landsat archive: first results // *Frontiers in Remote Sensing*. 2022. Vol. 3. URL : <https://www.frontiersin.org/journals/remote-sensing/articles/10.3389/frsen.2022.856903>. DOI: <https://doi.org/10.3389/frsen.2022.856903>.
22. Shermanov B. Assessment of degradation in mountain and foothill areas using GIS technologies in Parkent District, Uzbekistan // *New Uzbekistan Journal of Academic Research*. 2025. Vol. 2(2). P. 57–63. URL: <https://inlibrary.uz/index.php/yoitj/article/view/65984>.

REFERENCES

1. Aliboeva M.A., Zhabbarov Z.A., Fakhrutdinova M.F., Influence of natural factors on chemical properties of mining soil (on the example of soils of the Chatkal state biosphere reserve), *Scientific Review. Biological science*, 2022, No. 1, pp. 10–15, URL: <https://science-biology.ru/ru/article/view?id=1252>. (In Russ.)
2. Atlas of the soil cover of the Republic of Uzbekistan. Tashkent, 2010, 44 p. (In Russ.)
3. Gafurova L.A., Savin I.Yu., Djalilova G.T., Updating of soil map of mountainous regions of Uzbekistan, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2024, Vol. 118, pp. 21–47, DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2024-118-21-47>. (In Russ.)
4. Djalilova G.T., Geoinformation analysis of erosion processes in the middle and low mountains of Uzbekistan (on the example of soils of the Chatkal and Turkestan ranges), Extended abstract Dr. Biol. Sci. thesis, Tashkent, 2018, 53 p. (In Russ.)
5. Ivanov A.L., Savin I.Yu., Prudnikova E.Yu., Voronin A.Ya., Dukhanin Yu.A., Vernyuk Yu.I., Remote technologies for landscape adaptation of agriculture, Moscow: V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, 2025, 141 p. (In Russ.)
6. Kerzhentsev A.S., Functional ecology, Moscow: Nauka, 2006, 259 p. (In Russ.)
7. Myagkova N.V., Ecological aspects of climate change in Uzbekistan, *Universum: technical science*, 2019, No. 2(59), URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ekologicheskie-aspekty-izmeneniya-klimata-v-uzbekistane>. (In Russ.)
8. Nazarov A.S., Soils of the western spurs of the Chatkal ridge (on the example of soils of the Chatkal mountain-forest state reserve, Extended abstract of Cand. Agri. Sci. thesis, Tashkent, 1987, 21 p. (In Russ.)

9. Raupova N.B., Abdullaev S.A., Mineral-brown carbonate soils of the Western Tien Shan, their agrochemical properties and humus condition, *Bulletin of Science and Practice*, 2018, No. 2, pp. 153–161. (In Russ.)
10. Savin I.Yu., Otarov A., Zhogolev A.V., Ibraeva M.A., Duseikov S., Long-term changes in the area of saline soils recognized by Landsat images in Shauldersk irrigated massive, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2014, Vol. 74, pp. 49–65, DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2014-74-49-65>. (In Russ.)
11. Turabaev A., Description of some natural factors preserving the diversity of mountain brown soils (using the Chatkal and Nurata Mountains as an example), Extended abstract of Cand. Biol. Sci. thesis, Tashkent, 2011, 27 p. (In Russ.)
12. Turdaliev Zh.M., Mansurov Sh.S., Akhmedov A.U., Abdurakhmanov N.Yu., Salinization of soil-grounds and groundwater of the the Fergana Valley), *Scientific Review. Biological science*, 2019, No. 2, pp. 10–15, URL: <https://science-biology.ru/ru/article/view?id=1139>. (In Russ.)
13. Tursunov L., Khanazarov A., Fakhrutdinova M., Kamilova D., *Mountain soils of Uzbekistan*, Tashkent: “Turon-Ikbol”, 2009, 232 p.
14. Fakhrutdinova M.F., (Fractional and group composition of mountain-brown leached soils, *Acta Ntional University of Uzbekistan. Exact Sciences*, 2014, No. 3/2, pp. 79–82. (In Russ.)
15. Chen Q., Vaudour E., Richer-de-Forges A.C., Arrouays D., Spectral indices in remote sensing of soil: definition, popularity, and issues. A critical overview, *Remote Sensing of Environment*, 2025, Vol. 329, 114918, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2025.114918>.
16. Jombo S., Abd Elbasit M.A.M., Gumbo A.D., Nethengwe N.S., Remote Sensing Application in Mountainous Environments: A Bibliographic Analysis, *International journal of environmental research and public health*, 2023, Vol. 20(4), 3538, DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph20043538>.
17. Gafurova L.A., Djalilova G.T., Ergasheva O.X., Kadirova D.A., Measures on erosion-preventive forest melioration in mountain areas of Uzbekistan, *Journal of Critical Reviews*, 2020, No. 7(2), pp. 283–287, DOI: <https://doi.org/10.31838/jcr.07.02.52>.
18. Mammadov E., Nowosad J., Glaesser C., Estimation and mapping of surface soil properties in the Caucasus Mountains, Azerbaijan, using high-resolution remote sensing data, *Geoderma Regional*, Vol. 26, 2021, e00411, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2021.e00411>.
19. Mauro S.E.D., Soil Degradation: Overview and Critique, In: *Ecology, Soils, and the Left. Environmental Politics and Theory*, New York: Palgrave Macmillan, 2014, DOI: https://doi.org/10.1057/9781137350138_4.
20. Nabieva G.M., *Soils of the western spurs of the Chatkal ridge and their enzymatic activity*, Tashkent: NUU, 2008, 132 p.

21. Potapov P., Hansen M.C., Pickens A., Hernandez-Serna A., Tyukavina A., Turubanova S., Zalles V., Li X., Khan A., Stolle F., Harris N., Song X., Baggett A., Kommareddy I., Kommareddy A., The Global 2000-2020 Land cover and land use change dataset derived from the Landsat archive: first results, *Frontiers in Remote Sensing*, 2022, Vol. 3, URL: <https://www.frontiersin.org/journals/remote-sensing/articles/10.3389/frsen.2022.856903>, DOI: <https://doi.org/10.3389/frsen.2022.856903>.
22. Shermanov B., Assessment of degradation in mountain and foothill areas using GIS technologies in Parkent District, Uzbekistan, *New Uzbekistan Journal of Academic Research*, 2025, Vol. 2(2), pp. 57–63, URL: <https://inlibrary.uz/index.php/yoitj/article/view/65984>.

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2026-128-50-84



Ссылки для цитирования:

Апарин Б.Ф., Моргач Ю.Р., Сухачева Е.Ю., Кузьмина А.А., Лазарева М.А., Мингареева Е.В., Федорова М.Е. Изменения типоморфных характеристик чернозема южного при сельскохозяйственном использовании // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2026. Вып. 128. С. 50-84. DOI: 10.19047/0136-1694-2026-128-50-84

Cite this article as:

Aparin B.F., Morgach Yu.R., Sukhacheva E.Yu., Kuzmina A.A., Lazareva N.A., Mingareeva E.V., Fedorova M.E., Changes in typomorphic characteristics of southern chernozem during agricultural use, Dokuchaev Soil Bulletin, 2026, V. 128, pp. 50-84, DOI: 10.19047/0136-1694-2026-128-50-84

Благодарность:

Работа выполнена в рамках НИР № 0439-2024-0001.

Acknowledgments:

The studies were carried out as part of research work No. 0439-2024-0001.

Изменения типоморфных характеристик чернозема южного при сельскохозяйственном использовании

© 2026 г. Б. Ф. Апарин^{1,2*}, Ю. Р. Моргач¹, Е. Ю. Сухачева^{1,2},
А. А. Кузьмина¹, М. А. Лазарева¹, Е. В. Мингареева¹,
М. Е. Федорова¹

¹Центральный музей почвоведения им. В. В. Докучаева – филиал ФГБНУ
ФИЦ “Почвенный институт им. В. В. Докучаева”, Россия,
197375, Санкт-Петербург, Биржевой проезд, дом 6,
*<https://orcid.org/0000-0001-6012-0168>, e-mail: soilmuseum@bk.ru.

²Санкт-Петербургский государственный университет,
199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., дом 7–9.

Поступила в редакцию 01.08.2025, после доработки 18.11.2025,
принята к публикации 29.04.2026

Резюме: Настоящая работа посвящена изучению изменений типоморфных характеристик черноземов южных Волгоградской области на территории бывшего стационара АН СССР “Белые пруды”.

Исследования выполнены по трансекте, пересекающей с запада на восток два сельскохозяйственных поля, находящихся между тремя лентами Государственной лесополосы “Пенза–Каменск”. Для анализа динамики почвенных характеристик использовались образцы, отобранные в 1950 г., и в тех же местах спустя 70 лет, отобранные в 2021 г. Комплексные исследования проводились по следующим характеристикам: плотности сложения, агрегатный состав, pH, содержание гумуса, карбонатов, солей, обменных оснований. Выявлено, что длительное сельскохозяйственное использование не привело к значительным изменениям морфологического строения, гранулометрического состава, а также гумусового и солевых профилей исследуемых современных почв. Показано, что за изучаемый период с 1950 г. до 2021 г. наблюдается повышение плотности почвы и прослеживается тенденция к подкислению верхней части почвенного профиля и, напротив, к подщелачиванию его нижней части. Для выявления факторов изменения типоморфных характеристик были проанализированы данные многолетних наблюдений (100-летний период) за климатическими показателями. Выявлена сложная взаимосвязь между осадками и влагозапасами в почвах. Ретроспективный анализ показал высокую устойчивость к длительному сельскохозяйственному использованию профилеобразующего процесса, что объясняется малой изменчивостью климатической нормы почвообразования за последние 120 лет, глубоким залеганием грунтовых вод, равнинным рельефом местности и наличием лесных насаждений. При сохранении текущих тенденций количества и сезонной динамики осадков значительных изменений в почвенных свойствах не прогнозируется.

Ключевые слова: индикаторы; потенциальное плодородие; климатический потенциал; полигон почвенно-экологического мониторинга; ретроспективный мониторинг.

Changes in typomorphic characteristics of southern chernozem during agricultural use

© 2026 B. F. Aparin^{1,2*}, Yu. R. Morgach¹, E. Yu. Sukhacheva^{1,2},
A. A. Kuzmina¹, N. A. Lazareva¹, E. V. Mingareeva¹,
M. E. Fedorova¹

¹Central Soil Museum by V.V. Dokuchaev – Branch of the Federal Research Centre “V.V. Dokuchaev Soil Science Institute”,

6 Birzhevoy proezd, Saint Petersburg 197375, Russian Federation,
*<https://orcid.org/0000-0001-6012-0168>, e-mail: soilmuseum@bk.ru.

²Saint Petersburg State University,
Building 7–9 Universitetskaya Embankment,
Saint Petersburg 199034, Russian Federation.

Received 01.08.2025, Revised 18.11.2025, Accepted 29.04.2026

Abstract: This work is devoted to the study of changes in the typomorphic characteristics of the chernozems of the southern Volgograd region on the territory of the former landfill of the USSR Academy of Sciences “Belye prudy”. The studies were carried out along a transect crossing two agricultural fields from west to east, located between three ribbons of the “Penza-Kamensk” State Forest Belt. For the analysis of medium-term dynamics of soil characteristics, samples taken in 1950 and in the same places after 70 years, taken in 2021, were used. Complex studies were carried out according to the following characteristics: density of addition, aggregate composition, pH, content of humus, carbonates, salts, exchange bases. It was revealed that long-term agricultural use did not lead to significant changes in the morphological structure, particle size distribution, as well as humus and salt profiles of the studied modern soils. Studies in 2021 showed an increase in soil density, and in modern soils there is a tendency to acidify the upper part of the soil profile and, on the contrary, to alkalize its lower part. To identify factors of change in typomorphic characteristics, data from long-term observations (100 years) of climatic indicators were analyzed. A complex relationship has been identified between precipitation and moisture reserves in soils. A retrospective analysis showed high resistance to long-term agricultural use of the profile-forming process, which is explained by the constant climatic norm of soil formation, deep occurrence of groundwater, flat terrain, the presence of forest plantations and favorable climatic conditions. If the current trends in the amount and seasonal dynamics of precipitation continue, no significant changes in soil properties are predicted.

Keywords: indicators; potential fertility; climatic potential; soil-ecological monitoring polygon; retrospective monitoring.

ВВЕДЕНИЕ

Общепризнано, что длительному сельскохозяйственному использованию черноземов сопутствует ряд негативных изменений в составе и свойствах почв. В основном происходит уменьшение содержания гумуса, особенно в первые годы освоения, ухудшается структурное состояние почвы и развиваются эрозионные

процессы (Иванов, Лебедева, 2013; Кирюшин, 1996; Крупеников, 2008; Семенов, Когут, 2015; Холодов и др., 2019; Чевердин и др., 2015; Щеглов, 1995; Щербаков, 2000). Исследований в этой области много. Как правило, акцент в таких исследованиях делается на анализ изменений ограниченного числа почвенных параметров ($S_{орг.}$, pH, NPK, плотность сложения и др.) в пахотном слое на опытных полях. Их слабым местом является отсутствие четких временных интервалов изменений почвы и точной географической привязки объектов проведения мониторинга, а также недостаточная проработка методической базы подобных исследований. Комплексные работы на производственных участках единичны (Агроэкологическое состояние..., 1996; Афанасьева, 1980; Абакумов и др., 2009; Гурин и др., 2012; Приходько и др., 2024). Крайне редко проводится сопряженный анализ изменения климата за оцениваемый промежуток времени, что не позволяет оценить, насколько выявленные изменения отдельных свойств связаны с типоморфным процессом почвообразования или с отдельными элементарными почвенными процессами. Разрозненные данные о пространственно-временной изменчивости разных типов черноземов ограничивают возможности прогнозов последствий потепления климата и антропогенного воздействия на свойства почвы и своевременного принятия управленческих решений по сохранению плодородия.

Между тем именно типоморфные характеристики почв отражают структуру профилеобразующего процесса в конкретный момент времени, и, таким образом, являются индикаторами потенциального плодородия почв (Апарин, Сухачева, 2009).

Целью работы является исследование характера изменений типоморфных характеристик агрочернозема южного и факторов, определяющих их за последние 70 лет.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследование черноземов южных при сельскохозяйственном использовании проводилось в Волгоградской области на почвенно-геоморфологическом профиле (трансекте), заложенном на территории бывшего стационара АН СССР “Белые пруды” (Афанасьева, 1966; Афанасьева, 1980). Стационар был организован для

изучения лесорастительного потенциала почв на участке государственной лесополосы (ГЛП) “Пенза-Каменск”.

Стационар расположен на плоском участке дренированного водораздела р. Бузулук и р. Хопер. Характерными чертами климата территории являются продолжительное жаркое лето и холодная малоснежная зима с частыми оттепелями, а также резкий дефицит влаги в начале вегетационного периода, поздней весной и ранним летом (Сажин и др., 2017). Средняя испаряемость за теплый период близка к 800 мм при среднегодовой сумме осадков равной 437 мм, что обуславливает низкие значения коэффициента увлажнения – 0.57–0.58. (Афанасьева, 1980; Национальный атлас..., 2004). Сумма активных температур в среднем составляет 2 725 °С, а гидротермический коэффициент Селянинова (ГТК) колеблется от 0.5 до 1, что характерно для зоны засушливого земледелия (Карманов, Булгаков, 2012).

ГЛП была заложена в 1949 г. на старопашотных землях, на тот момент уже используемых в земледелии около 150 лет. Освоение земель началось в этом регионе в XVII в. Изначально применялась переложная система земледелия с чередованием: пшеница – рожь – залежь. В начале 30-х годов XX в. ее сменила традиционная трехпольная система. Современные севообороты района исследований – это зерно-паро-пропашные культуры с подсолнечником. Из зерновых преобладает озимая пшеница (Беляков, 2019). В последние годы также высевают рапс, гречиху, нут.

ГЛП в районе исследований представляет собой три параллельные ленты лесонасаждений (дубово-ясеновые) шириной по 60 м с расстоянием между ними в 300 м, занятых пашнями. В центре каждой лесополосы под двухлетними насаждениями Е.А. Афанасьевой в 1950 г. были заложены разрезы (210, 209, 211) и отобраны образцы до глубины 300 см. Расстояние между крайними разрезами составляет 720 м, а соседними 360 м. Образцы в воздушно-сухом состоянии хранились в стеклянных сосудах в фондах Центрального музея почвоведения им. В.В. Докучаева. Они входят в состав Биоресурсной коллекции почвенных монолитов и образцов музея, предназначенных для осуществления почвенно-экологического мониторинга (Мингареева, Захарова, 2024). Спустя 70 лет на пахотных почвах между лесополосами были за-

ложены разрезы (3.21 и 5.21) вне зоны непосредственного влияния лесонасаждения (рис. 1). Расстояние между этими разрезами также 360 м.

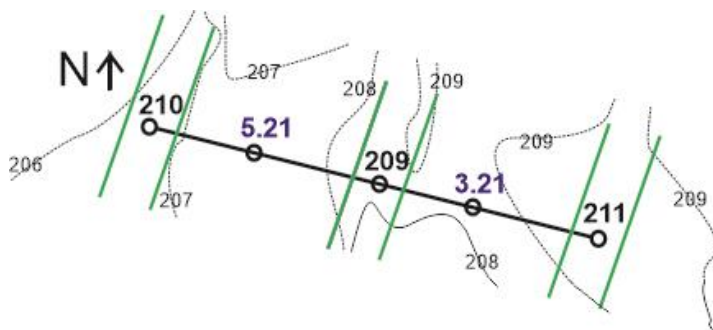


Рис. 1. Схема расположения разрезов по трансекте.

Fig. 1. Soil pits layout along the transect.

Аналитические исследования образцов почв 1950 и 2021 гг. проводились в соответствии с общепринятыми методами (Соколов, 1975; Воробьева, 2006; Растворова, 1983): гранулометрический состав (Воробьева, 2006) и агрегатный состав (метод сухого просеивания), реакция почвенного раствора (Растворова и др., 1995), содержание карбонатов (Растворова, 1983), плотность сложения (Растворова, 1983) и углерод органических соединений ($C_{орг.}$) (Воробьева, 2006) с последующим пересчетом на гумус.

Засоление почв оценивалось методом водной вытяжки 1 : 5 (Химический анализ..., 1998). Сумма токсичных солей ($\Sigma_{токс}$) рассчитывалась согласно принципам, изложенным в книге “Засоленные почвы России” (2006), определение химизма засоления – по ключу- определителю (Научные основы..., 2013). Оценка степени засоленности горизонта проводилась по суммарному содержанию токсичных солей в зависимости от химизма засоления (Егоров и др., 1977).

Сравнение почв разных сроков отбора проводилось по следующей схеме. Вначале давалась характеристика почв отдельно по годам, затем сравнивались характеристики почв разных сроков отбора.

В основу исследований положены представления о взаимосвязи типоморфных показателей почв, находящихся в климаксном состоянии, и об их отклонении, как индикаторов изменения факторов почвообразования (климата и растительности). За типоморфные признаки приняты: морфогенетические, физические и химические профили почв, сформировавшиеся в течение длительного процесса развития почвы при постоянной климатической норме почвообразования и зональном типе растительности (Апарин, Сухачева, 2019). В понятие типоморфных профилей почв в совокупности включается характеристика послойного изменения показателей и тип их изменчивости.

Для сравнения с характеристиками современных пахотных почв (р. 5.21 и р. 3.21) данные по почвам 1950 г. отбора образцов (р. 210, р. 209, р. 211) были приняты за исходные, так как в 1950 г. возраст лесопосадок не превышал 2 лет, и саженцы не могли оказать существенного влияния на почвы. Данные разреза 5.21 сравнивались с усредненными значениями характеристик разрезов 210 и 209, а разрез 3.21 – с усредненными показателями разрезов 209 и 211 (рис. 1).

В качестве основания для использования усредненных данных проводилась проверка различий между почвами 1950 г. отбора (р. 209, р. 210, р. 211) для слоев 0–30 и 0–260 см с помощью непараметрических критериев: U-критерий Манна–Уитни и H-критерий Краскела–Уоллиса. U-критерий позволяет сравнивать две независимые выборки, а H-критерий предназначен для проверки равенства медиан нескольких выборок и является обобщением U-критерия Манна–Уитни. Расчеты проводились на электронном портале: <https://www.statskingdom.com/>.

Расчет проводился по данным гранулометрического (фракции <0.001 и <0.01 мм) и агрегатного (по преобладающим фракциям >10 , $5-3$, $3-1$ мм, а также по суммарному содержанию фракций <1 мм) состава, так как данные свойства наиболее устойчивые. Расчет U-критерия Манна–Уитни не выявил разницы между содержанием фракций гранулометрического и агрегатного составов в парах р. 209–р. 210 и р. 209–р. 211 для глубин 0–30 и 0–260 см. H-критерий Краскела–Уоллиса показал, что существует незначительная разница в содержании рассматриваемых фракций грану-

лометрического и агрегатного составов между тремя почвами. Это дает основание для сравнения усредненных данных по почвам 1950 г. отбора с современными почвами.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Морфологическое строение

Исследуемые почвы сформировались на лёссовидных пылеватых глинах мощностью более 10 м и имеют типичное для агро-черноземов строение профиля: PU-AU-AB-CAT-C_{ca}.

По данным Е.А. Афанасьевой (Афанасьева, 1980), в 1950 г. почвы имели следующие характеристики морфологического строения: мощность гумусового горизонта в почвах трансекты варьировала от 75 до 80 см; нижняя граница горизонта – языковатая; верхняя граница вскипания проходила на глубине 25–30 см, а максимум карбонатов был приурочен к глубине 80–90 см. Новообразования на этой глубине были представлены белоглазкой и рассеянными карбонатами, а глубже 90 см – только карбонатами, находящимися в рассеянном состоянии. В описании почв 1950 г. отмечалось, что новообразования гипса морфологически не были выражены. Уровень грунтовых вод был ниже 7 м.

За 70 лет принципиальных изменений в морфологическом строении агрочерноземов не произошло. Некоторое варьирование мощности гумусового горизонта (до 10 см) может быть связано с пространственной неоднородностью. Отмечено обилие гумусовых кутан в средней части профиля (30–80 см). Ниже их количество резко уменьшается. На глубине 170 см выделяются мелкие кристаллы гипса.

Гранулометрический состав

Почвы всех исследованных разрезов (210, 209, 211, 5.21, 3.21) сформированы на однородной почвообразующей породе тяжелого гранулометрического состава. Среднее содержание физической глины (<0.01 мм) в образцах породы составило 73% (диапазон 71–73%), а илистой фракции (<0.001 мм) – 39% (диапазон 37–42%).

В верхней части профилей почв (слой 0–50 см) содержание фракций физической глины и ила меньше, чем в почвообразую-

шей породе, как в образцах 1950 г., так и 2021 г. (в среднем на 7%).

В почвах р. 210, р. 209, р. 211 в пахотном слое (0–20 см) четко выражено уменьшение доли фракции физической глины с запада на восток. В современной почве р. 5.21 (расположенной между западной и центральной лесополосами) содержание фракций физической глины в слое 0–20 см практически не отличается от почвообразующей породы, а по сравнению с усредненными данными почв р. 210 – р. 209 наблюдается более высокое ее содержание.

Агрегатный состав

В агрочерноземах 1950 г. отбора в слое 0–50 см преобладающими агрегатами так же, как и в почвообразующей породе, являются две фракции >10 и 3–1 мм. Их содержание в профиле изменяется в диапазоне 7–39% и 15–40% соответственно и носит асимметричный характер распределения по слоям (при увеличении одной фракции уменьшается содержание другой) в р. 210 и р. 209 и симметричный – в р.211. На глубине 30–40 и 40–50 см возрастает количество агрегатов 5–3 мм (до 18.7%). В почвах отмечается высокое содержание агрегатов <1 мм на глубине 0–20 см. Их суммарное количество в р. 210 и р. 211 превышает 41.5%, а в почве р. 209 – 20.5%.

По характеру изменения содержания фракций 1–0.25 и <0.25 мм профили агрочерноземов можно разделить по границе 40 см на 2 части. Верхняя часть – это область широкого варьирования содержания агрегатов 1–0.25 и <0.25 мм. В нижней части диапазон содержания фракций значительно сужается (рис. 2).

В современных образцах (р. 5.21 и р. 3.21) также преобладают фракции >10 и 3–1 мм при увеличении доли фракций 10–7 и 5–3 мм на глубине 10–30 см. Наибольшие изменения произошли в содержании микроагрегатов (<1 мм). Их количество значительно уменьшилось (<11%), слабо изменяясь по профилю. Исключением является слой 0–10 см в р. 3.21, где содержание микроагрегатов составляет 19.2% (рис. 2).

В почвах 1950 г. отбора образцов коэффициент структурности ($K_{стр.}$) свидетельствует о хорошем (1.1–1.4) и отличном агре-

гатном состоянии почв (1.7–5.9). В современной почве р. 5.21 структурное состояние незначительно ухудшилось в слое 0–20 см, а ниже практически не изменилось ($K_{стр.}$ 0.8–3.7). В р. 3.21 структурное состояние значительно улучшилось ($K_{стр.}$ 3.0–11.1) (рис. 3). На графике четко прослеживается деление профиля почв на две части по глубине 30–40 см.

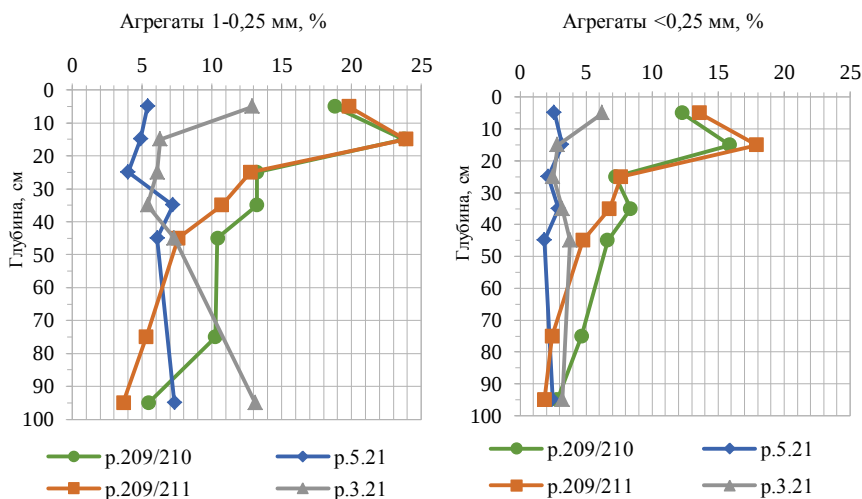


Рис. 2. Содержание микроагрегатов в профиле почв.
Fig. 2. The content of microaggregates in the profile of soils.

Плотность

По данным Е.А. Афанасьевой (Афанасьева, 1980), средние значения плотности сложения почв равномерно увеличиваются с 1.0 до 1.6 г/см³ в 1950 г. в верхних 100 см. Прогрессивное разуплотнение в профиле почв наблюдается с 60 см. Иной характер профильного распределения плотности наблюдается в современной почве. На глубине 10 см плотность резко возрастает до 1.50 г/см³. На глубине 40 см разница в плотности сложения между почвами разных сроков отбора становится минимальной и составляет 1.35 г/см³. Аналогичный ход изменения плотности сложения по глубине профиля отмечается в р. 5.21 (Гурин и др., 2012).

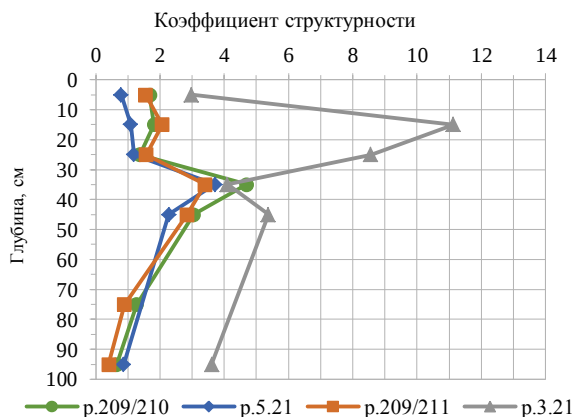


Рис. 3. Коэффициент структурности почв.

Fig. 3. Coefficient of soil structure.

Содержание гумуса

Мощность гумусового профиля, за нижнюю границу которого принято содержание гумуса 2% (Афанасьева, 1980; Пономарева, Плотникова, 1974), находится в диапазоне 60–65 см. По характеру изменения содержания гумуса по глубине агрочерноземы относятся к типу профиля убывающий малогумусный среднеглубокий (Апарин и др., 2024).

Гумусовый профиль почв 2021 г. отбора образцов идентичен профилю 1950 г. (рис. 4). Сравнительный анализ содержания гумуса по глубине в почвах разных сроков отбора образцов показал, что глубина усредненных профилей практически не изменилась. Отмечено незначительное уменьшение мощности гумусового профиля разреза 3.21. Четко выраженных закономерностей изменения содержания гумуса в слое 20–40 см по глубине разных сроков отбора образцов не наблюдается. В слое 0–10 см содержание гумуса практически одинаково во всех образцах. Можно отметить более значительное уменьшение содержания гумуса в слое 10–20 см по сравнению с почвами 1950 г. отбора образцов.

Содержание гумуса в верхней части корнеобитаемого слоя (0–30 см), где сосредоточена основная масса корней культурных

растений, изменяется в интервале 4.0–5.2%, равномерно уменьшаясь по слоям.

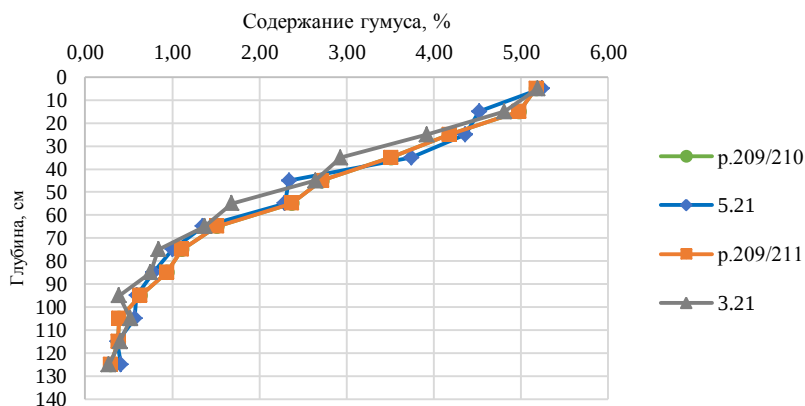


Рис. 4. Динамика содержания гумуса в почвах.

Fig. 4. Dynamics of humus content in soils.

В современный период на данной территории ввиду высокого сельскохозяйственного освоения отсутствуют участки с целинными черноземами, поэтому для сравнения был взят чернозем целинного участка полигона почвенно-экологического мониторинга “Козловский” однотипный по факторам почвообразования (Апарин и др., 2024). Запасы гумуса в слое 0–20 см практически одинаковы: для целинной – 139.8 т/га, а по усредненным данным трех разрезов 1950 г. при плотности 1.3 г/см^3 – 131.9 т/га.

Реакция среды

График изменения реакции среды исследованных почв в 1950 г. можно разделить на 2 части (рис. 5). В верхней части (0–60 см) pH варьирует в диапазоне 6.8–8Я.3, причем в разрезах 210 и 211 наблюдается небольшое подкисление в слое 10–20 см и заметное подщелачивание в слое 30–50 см в разрезах 209 и 210.

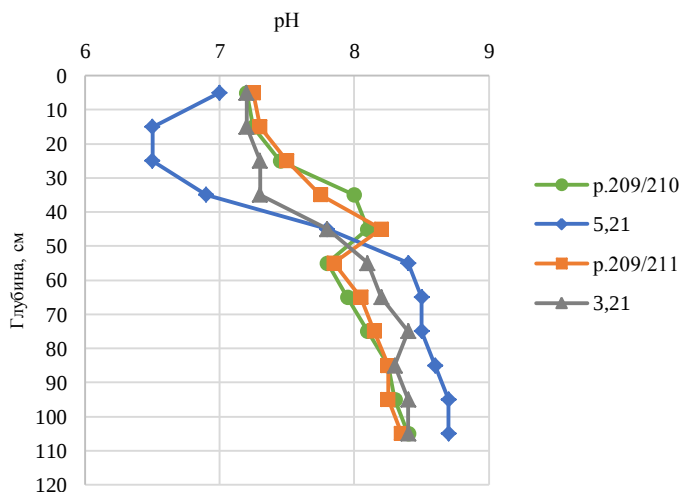


Рис. 5. Кислотно-щелочной профиль почв (диапазон pH 6–7.5 – оптимум для пшеницы).

Fig. 5. Soil pH profile (pH range 6–7.5 – optimal for wheat).

В нижней части профиля (глубже 60 см) во всех разрезах заметно постепенное повышение pH. В целом кислотно-щелочной профиль 1950 г. отбора образцов имеет S-образный характер с четко выраженным максимумом pH на глубине 40–50 см. Наблюдается тенденция снижения в пахотном слое величины pH.

Реакция среды в образцах почв 2021 г. отбора, при сохранении S-образной формы профиля pH, существенно различается (рис. 5). По сравнению с 1950 г. наблюдается снижение границы pH со значением 7,3 на 20 см. С глубины 50 см значения pH увеличиваются. Наибольший диапазон изменений pH наблюдается в почве разреза 5.21 (рис. 5).

Карбонаты

Карбонатные новообразования во всех разрезах появляются с глубины 20–30 см, однако по характеру изменения в содержании карбонатов все профили разделяются на 2 части на отметке 60–70 см (рис. 6). В верхней части до 50 см изменения содержания

карбонатов носят линейный характер, прогрессивно увеличиваясь с глубиной. Далее с глубины 70 см характер изменения содержания карбонатов существенно различается по сравнению с образцами 1950 г.

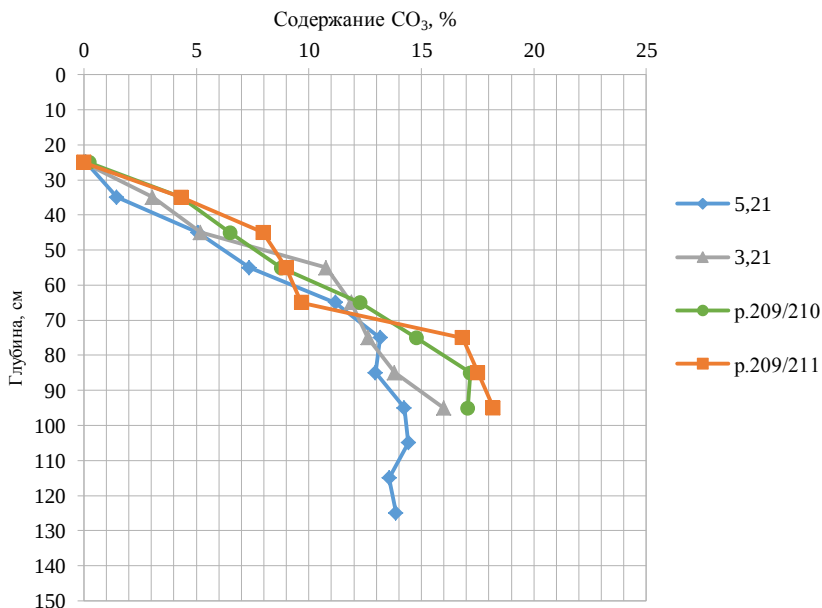


Рис. 6. Содержание карбонатов в почвах.

Fig. 6. Carbonate content in soils.

По содержанию карбонатов в образцах 1950 г. хорошо выражены максимумы на глубине 80 см. В современных почвах содержание карбонатов уменьшается с 8–9% до 5.5–6% и отсутствует зона их аккумуляции.

Обменные основания

Сумма обменных оснований в исследуемых агрочерноземах 1950 г. отбора образцов изменяется в диапазоне 30.4–36.2 смоль/кг в слое 0–50 см, что соответствует литературным данным (Дегтярева, 1979). Характер изменения содержания обменных основа-

ний по глубине прогрессивно-аккумулятивный (рис. 7). Разница в их количестве составляет меньше 3 единиц. Спустя 70 лет содержание обменных оснований осталось в том же диапазоне, за исключением р. 3.21, в котором на глубине 0–10 см обменных оснований на 2 единицы больше. Характер профильного распределения обменных оснований в р. 5.21 не изменился, а в р. 3.21 стал регрессивно-аккумулятивный.

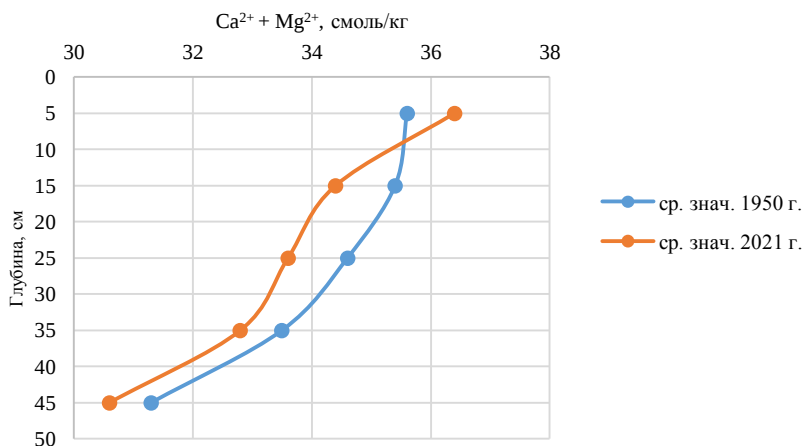


Рис. 7. Средние значения суммы обменных оснований в почвах.

Fig. 7. Average values of the sum of exchange bases in soils.

Легкорастворимые соли

Все профили агрочерноземов в 1950 г. (р. 209, 210, 211) можно разделить на четыре зоны по содержанию и характеру распределения легкорастворимых солей (рис. 8). Первая часть (0–80 (100) см) характеризуется отсутствием или очень низким засолением ($\Sigma_{\text{токс}} \leq 0.03\%$). Вторая часть (80 (100) – 140 (170) см) отличается слабым содовым засолением ($\Sigma_{\text{токс}} \leq 0.14\%$). По глубине залегания первого от поверхности засоленного горизонта почвы характеризуются как глубокосолончаковатые (Егоров и др., 1977).

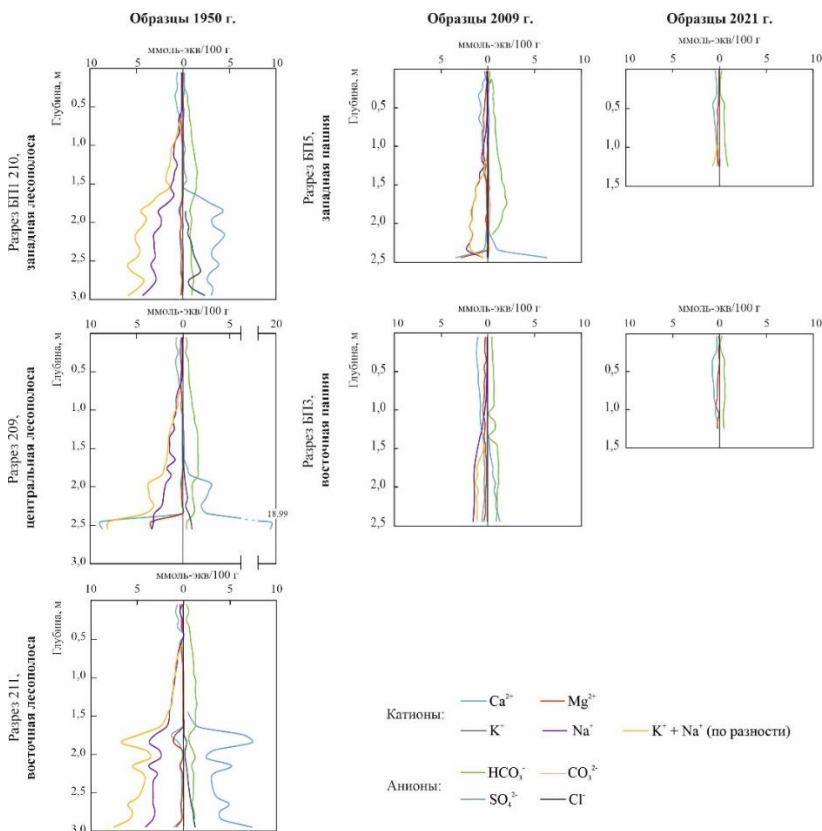


Рис. 8. Солевые профили почв разных сроков отбора образцов.

Fig. 8. Salinity profiles of soils at different sampling periods.

В пределах этих двух частей различия в химизме не существенны. В слое ниже глубины 140 (170 см) степень засоления преимущественно средняя, химизм засоления сменяется на содово-сульфатный и сульфатный с участием соды ($\Sigma_{\text{токс}} \leq 0.38\%$). В большинстве образцов доля токсичной щелочности не превышает 20% от суммы анионов. В разрезах 211 и 210 с глубины 220 (270) см выделяется четвертый слой. Химизм засоления в нем хлоридно-сульфатный с участием соды ($\Sigma_{\text{токс}} \leq 0.37\%$), степень

засоления средняя. В разрезе 209 на этой глубине отмечено сильное сульфатное засоление ($\Sigma_{\text{токс}} = 1.05\text{--}1.06\%$).

В современных почвах солевые профили изучались в 2009 и 2021 гг. Исследования 2009 г. показали, что суммарное количество солей в толще до 2.5 м уменьшилось. В слое 130–220 см наблюдается содовое засоление ($\Sigma_{\text{токс}} = 0.07\text{--}0.19\%$). В слое 220–240 см химизм солей меняется на сульфатно- содовый, сумма токсичных солей близка к порогу токсичности ($\Sigma_{\text{токс}} = 0.15\text{--}0.16\%$). В слое 240–250 см содержание сульфатов хотя и резко возрастает, но засоление слабое ($\Sigma_{\text{токс}} = 0.21\%$). Почва на восточной пашне (р. 3.21) не засолена.

В 2021 г. содержание легкорастворимых солей еще более уменьшилось по сравнению с 2009 г. Почвы обоих разрезов являются незасоленными в верхнем метровом слое. На глубине 110–130 см в р. 5.21 содержание ЛРС превышает порог токсичности ($\Sigma_{\text{токс}} = 0.05\text{--}0.06\%$, засоление содовое). В р. 3.21 содержание солей до глубины 1.3 м незначительно ($\Sigma_{\text{токс}} \leq 0.02\%$).

Анализ изменений типоморфных характеристик агрочерноземов

Материалы исследований выявили разноплановое среднесрочное изменение типоморфных характеристик черноземов южных при сельскохозяйственном использовании.

Выявлено, что в слое 0–10 см практически нет изменений (рис. 4–6). За последние 70 лет в морфологическом строении почв не произошло существенных изменений. Незначительные колебания мощности гумусовых горизонтов можно объяснить отсутствием четких критериев выделения нижней границы при сильной языковатости. В профиле сохранились важные диагностические признаки естественных почв – кутаны и белоглазка. Индикаторов подъема уровня грунтовых вод (капиллярная кайма) в почвах не обнаружено.

Достоверных различий в гранулометрическом составе рассмотренных образцов почв также не установлено. Можно говорить о тенденции к увеличению содержания пылеватых частиц в пахотных почвах межполосных пространств ГЛП. Это может быть связано с ослаблением несущей способности ветра центральными

и восточными лесополосами и осаждением мелких частиц. Косвенным подтверждением этого может быть наличие ¹³⁷Cs в поверхностных слоях современных пахотных и лесных почв на трансекте (Апарин и др., 2017).

Структура пахотного горизонта, по сравнению с вариантом под степной растительностью, нарушена. В агрегатном составе появляется глыбистость на первом уровне. Наиболее существенным изменением является уменьшение содержания в пахотном горизонте микроагрегатов (< 1.0 мм). Возможной причиной этого является применение в настоящее время поверхностной обработки почвы вместо плужной. Вместе с тем уменьшение доли микроагрегатов ниже пахотного горизонта говорит о том, что процесс перерепарганизации агрегатного состава во времени более сложен, и его нельзя свести только к влиянию механической обработки почвы (Апарин, Мингареева, 2024).

Исследования выявили заметное уплотнение почвы в 2021 г., кроме слоя 0–10 см, что является следствием обработки почвы тяжелой сельскохозяйственной техникой. В то же время это противоречит значениям коэффициентов структурности почвы, который находился в оптимальном интервале в разные периоды исследования. Данный вопрос нуждается в дополнительном исследовании.

Тип гумусового профиля (убывающий малогумусный среднеглубокий) за 70 лет не изменился. При этом в средней части профиля выявлено небольшое изменение в содержании гумуса (рис. 9). По данным распределения содержания гумуса в профилях почв 1950 г. (среднее по р. 209, 210, 211), в пределах верхнего полуметра снижение происходит равномерно и описывается линейным уравнением вида: $y = -6.141x + 5.6612$ (коэффициент детерминации $R^2 = 0.98$). В средней части профиля ход уменьшения содержания гумуса приобретает нелинейный характер. Наиболее точно оно описывается степенной функцией вида: $y = 0.5241x^{-2.57}$, $R^2 = 0.98$.

Профильное распределение гумуса в пахотных почвах в 2021 г. (среднее по р. 5.21, 3.21) подчиняется схожим закономерностям (рис. 9). В слое 0–55 см уменьшение содержания гумуса с глубиной описывается линейной зависимостью, а глубже измене-

ние описывается степенной функцией.

Сравнение линий аппроксимации демонстрирует незначительные отличия между гумусовыми профилями в 1950 и 2021 гг. Наблюдается средняя нелинейная взаимосвязь между содержанием гумуса и значениями суммы обменных оснований. С уменьшением содержания гумуса уменьшаются значения суммы обменных оснований.

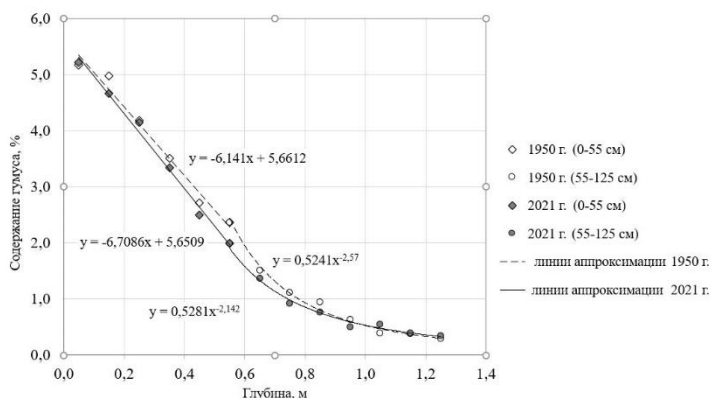


Рис. 9. Изменение содержания гумуса с глубиной в пахотных почвах (усредненные значения).

Fig. 9. Changes in humus content with depth in arable soils (averaged values).

Кислотно-щелочной профиль почвы 2021 г., по сравнению с 1950 г., существенно изменился при сохранении двучленного строения. В верхней части профиля (0–40 см) реакция среды сместилась со щелочной в более кислый диапазон в р. 5.21 и ближе к нейтральным значениям в р. 3.21. Напротив, в нижней части профиля произошло заметное увеличение рН (до 0.5 единиц). Подкисление почвы возможно связано с внесением физиологически кислых удобрений.

Профильное изменение содержания карбонатов можно приближенно описать возрастающей логарифмической функцией (рис. 10). В 1950 г. уравнение зависимости имеет вид:

$y = 14.291\ln(x) + 18.567$, коэффициент детерминации $R^2 = 0.97$. В 2021 г. изменения характеризуются уравнением: $y = 12.025\ln(x) + 15.838$, $R^2 = 0.98$. Сравнение линий трендов показывает более значительный рост содержания карбонатов с глубиной в 1950 г. по сравнению с 2021 г.

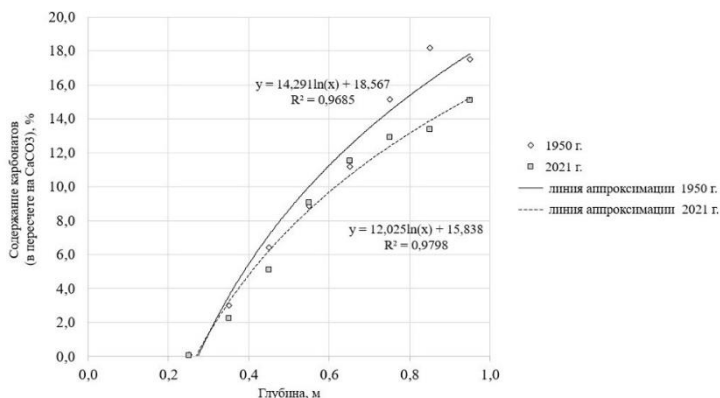


Рис. 10. Изменение среднего содержания карбонатов с глубиной по данным 1950 и 2021 гг. Аппроксимация функцией вида $y = a \cdot \ln(x) + b$, где y – содержание карбонатов (в пересчете на CaCO_3 , %), x – глубина отбора образца (м).

Fig. 10. Change in the content of carbonates with depth according to 1950 and 2021. Approximation by function of $y = a \cdot \ln(x) + b$, where y is the carbonate content (calculated on CaCO_3 , %), x is the sample depth (m).

Анализ кислотно-щелочного и карбонатного профилей показал, что снижению содержания карбонатов в верхней части профиля сопутствует снижение величины pH. В нижней части профиля такой связи нет, напротив, содержание карбонатов уменьшается, а величина pH возрастает. Вероятно, более щелочная реакция в нижней части профиля связана со слабым содовым засолением.

Характерной особенностью солевого профиля всех почв в различные периоды наблюдений является постепенное возраста-

ние содержания легкорастворимых солей с глубиной при их общем незначительном количестве в верхней 1.5- метровой толще. Глубже химизм засоления преимущественно содовый. В глубоких слоях в составе солей доминируют сульфаты. Наблюдается четкая тенденция к выщелачиванию солей за 70- летний период сельскохозяйственного использования.

Анализ факторов изменения типоморфных характеристик почв за 70 лет

Для выявления причин среднесрочных изменений типоморфных характеристик агрочерноземов был проведен анализ факторов, которые могли оказать значимое воздействие на почвы. Все факторы среднесрочного изменения типоморфных характеристик разделены на 2 группы: антропогенные и естественные (климатические). Прежде всего были проанализированы тренды климатических показателей как одна из возможных причин временной изменчивости типоморфных характеристик почв. Их анализ важен в двух аспектах. Во-первых, с ними связана климатическая норма почвообразования и, следовательно, потенциальное плодородие почв, а также водный и тепловой режимы почв, обуславливающие актуальное плодородие (Апарин, 1997). Во-вторых, анализ трендов служит основанием для выявления долгосрочных изменений климатических показателей и позволяет делать прогноз типоморфных характеристик на ближайшее будущее.

С этой целью был проведен анализ рядов многолетней изменчивости среднегодовых температур воздуха и годовых сумм осадков за период с 1900 по 2022 гг. по данным метеостанции Рудня, ближайшей к “Белым прудам” (Погода и климат..., <http://www.pogodaiklimat.ru/history/34262.htm>). Многолетние среднегодовые показатели температуры воздуха составили 6.37 ± 0.22 °C (коэффициент вариации 19.3%), а сумма осадков – 437 ± 15 мм (коэффициент вариации 19.4%). Рассмотренные ряды были поделены на два периода: первый, предшествующий началу исследований (до 1950-го г.) и второй период с 1950 по 2022 гг. (рис. 11). В рассматриваемых периодах наблюдаются циклические колебания как средних годовых температур воздуха, так и годо-

вых сумм осадков, определяющие погодные условия в вегетационный период.

До 1950-го г. в циклах колебания температуры воздуха преобладали серии с отрицательными отклонениями – 58%, тогда как серии с положительными отклонениями составляли лишь 9%.

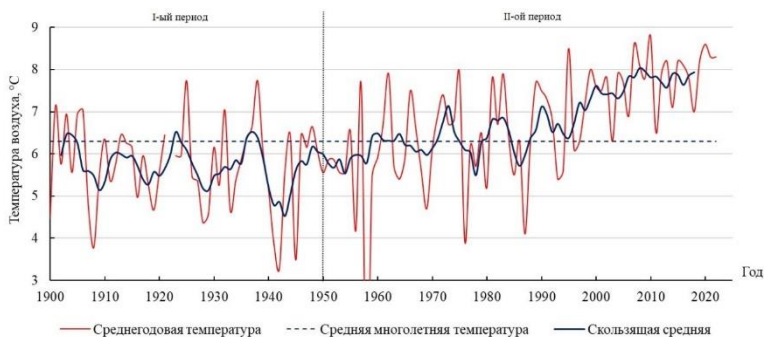


Рис. 11. Многолетняя изменчивость средней годовой температуры воздуха за период с 1900 г. по 2022 г. по данным метеостанции Рудня.

Fig. 11. Multiyear variability of mean annual air temperature for the period from 1900 to 2022 according to the data of Rudnya meteorological station.

Такие данные позволяют охарактеризовать этот период как условно холодный. Среднее отклонение от многолетней среднегодовой температуры воздуха в 1900–1950 гг. составило 0.89 ± 0.22 °С. С 1950-го г. начинается и продолжается в настоящее время условно теплый период с преобладанием серий с положительными отклонениями (60.6%). Среднее отклонение от многолетней среднегодовой температуры воздуха в 1950–2022 гг. составило 1.13 ± 0.22 °С. Четко выделяется в представленном ряду (рис. 11) серия лет с положительными отклонениями, начавшаяся в 1995-ом г. За последние 28 лет наблюдений не было зафиксировано падения температуры ниже многолетней средней как в холодное, так и в теплое полугодие.

В ряду изменчивости годовых сумм осадков (рис. 12) также могут быть выделены короткие серии с продолжительностью

1–3 года, которые объединяются в циклы с длительностью от 2 до 7 лет с преобладанием 4-летних. С 1900 по 2022 гг. количество циклов с отрицательными отклонениями составило 48.31%, с положительными – 41.53%. Смена сухих и влажных лет происходит постоянно (со средней периодичностью в 2–4 года). В ряду многолетней изменчивости осадков продолжительные периоды с преобладанием положительных или отрицательных отклонений не выражены.

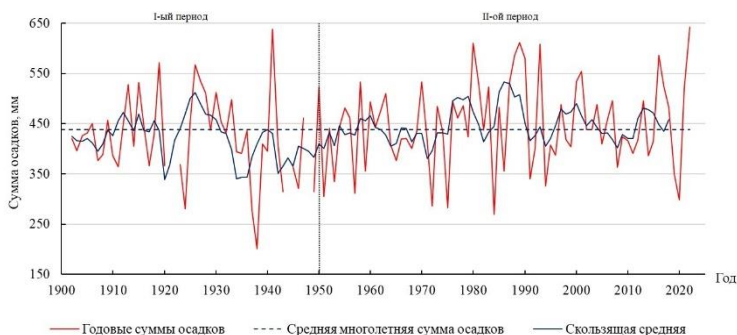


Рис. 12. Многолетняя изменчивость годовой суммы осадков за период с 1900 г. по 2022 г. по данным метеостанции Рудня.

Fig. 12. Multiyear variability of annual precipitation for the period from 1900 to 2022 according to the data of Rudnya meteorological station.

В формировании типоморфных характеристик почв определяющее значение имеет климатическая норма почвообразования (Апарин, Сухачева, 2019). Исследуемый период, начиная с 1901 г., может быть разделен на 4 климатические нормы. За стандартную климатическую норму принимаются средние климатические показатели за 30-летний период (Руководящие указания..., 2017).

Как следует из таблицы 1, профилеобразующий процесс с 1900 по 1950 гг. протекал практически при неизменной климатической норме температуры воздуха. Период после 1950-го года в большей степени характеризуется двумя последними тридцатилетиями, для которых отмечается постепенное возрастание климатической нормы температуры воздуха (табл. 1). Наиболее значи-

тельный рост температур отмечен в январе и феврале (на 2.7 °С и 3.8 °С по сравнению с началом периода исследований). В вегетационный период рост температуры незначительный.

Таблица 1. Среднемесячные и среднегодовые температуры воздуха (°С) по 30-летиям

Table 1. Average monthly and average annual air temperatures (°C) for 30-year periods

Период	январ.	фев.	март	апр.	май	июнь	июль
1901–1930	-9.4	-10.5	-4.3	6.6	14.7	18.8	19.7
1931–1960	-10.4	-10.6	-4.4	7.2	14.7	18.7	19.7
1961–1990	-9.5	-9.2	-2.9	8.3	15.9	19.8	21.6
1991–2020	-6.7	-6.7	-0.9	8.8	15.9	19.9	22.0
Период	авг.	сен.	окт.	нояб.	дек.	год	
1901–1930	18.7	12.6	5.5	-1.0	-7.0	5.8	
1931–1960	19.2	13.1	6.0	-1.8	-6.9	5.7	
1961–1990	19.9	13.7	6.0	-0.6	-6.1	6.4	
1991–2020	20.7	14.1	7.4	0.3	-5.0	7.5	

Климатическая норма среднегодовых сумм осадков (табл. 2) за весь период наблюдений изменяется в узком диапазоне. Наибольших изменений достигают суммы осадков для зимних месяцев.

Данные наблюдения Е.А. Афанасьевой показали, что прямой связи между динамикой продуктивных влагозапасов почвы с осадками текущего вегетационного периода нет. Оценка процессов, определяющих частоту, глубину и период промачивания почв, должна осуществляться с учетом осадков предшествующего вегетационного периода и цикличности их изменения. Для оценки связи осадков, выпадающих в течение года, с динамикой почвенной влаги были проанализированы данные об изменении элементов баланса почвенной влаги на пашне за 3 года, полученные на

стационаре “Белые пруды” в 1950–1952 гг. (Афанасьева, 1980) (табл. 3).

Таблица 2. Среднемесячные и среднегодовые суммы осадков (мм) по 30-летиям

Table 2. Average monthly and average annual precipitation (mm) for 30-year periods

Период	январь	фев.	март	апр.	май	июнь	июль
1901–1930	29	21	23	20	21	37	28
1931–1960	28	23	20	28	35	44	42
1961–1990	39	25	25	29	36	50	47
1991–2020	41	26	31	32	32	42	31
Период	авг.	сентяб.	окт.	нояб.	декаб.	год	
1901–1930	20	37	31	40	42	439	
1931–1960	42	33	36	32	31	407	
1961–1990	43	41	31	44	42	457	
1991–2020	24	40	30	39	40	438	

Период наблюдений за водным балансом попадает в короткий 3-летний цикл, в котором 1950 г. может быть охарактеризован как влажный, так как годовая сумма осадков в этот год превысила многолетнюю среднюю на 84 мм. Следующий 1951 г. был сухим (годовая сумма осадков ниже многолетней средней на 105 мм), а 1952 г. – нейтральным (годовая сумма осадков близка к многолетней средней).

Анализ данных таблицы 3 показал, что наибольший весенний влагозапас наблюдался в 1951 г. после предшествующего влажного 1950 г. – весенний влагозапас в слое 0–50 см превысил НВ практически на 25%. Это, вероятно, связано с обильными позднелетними осадками и наименьшим за период наблюдений осенним дефицитом влаги, зафиксированным в 1950 г. Вегетационный сезон 1951 г. был относительно засушливым, что проявилось в значительных расходах влаги из почвенного влагозапаса. Позднелетние осадки в 1951 г. также не были обильными, и это

предопределило низкие значения весеннего влагозапаса в последний год наблюдений. Значения осеннего дефицита влаги в 1952 г. превысили таковые во все предшествующие годы наблюдений, несмотря на то что в летние месяцы наблюдались относительно обильные осадки. Засушливость вегетационного сезона и низкие значения коэффициента увлажнения приводят к тому, что осадки, выпадающие с мая по август, расходуются исключительно на транспирацию растений и, как правило, не проникают в почву глубже 50 см (Афанасьева, 1980).

Таблица 3. Осадки и элементы баланса влаги (мм) в слое почвы 0–50 см (по Афанасьевой, 1980)

Table 3. Precipitation and moisture balance elements (mm) in the soil layer 0–50 cm (according to Afanasyeva, 1980)

Год	ПЗВ	ВЗВ	ОЗВ	РВЗ	РВС	ОДВ	НВ	ВЗ
1950	81	175	103	72	343	72	175	80
1951	17	220	95	125	205	80		
1952	80	175	84	91	316	91		
Год	Осадки май–август		Осадки сентябрь–ноябрь			Годовая сумма осадков		
1950	212		180			522		
1951	148		83			305		
1952	263		91			441		

Примечание. ПЗВ – весеннее приращение запаса влаги, ВЗВ – весенний запас влаги, ОЗВ – осенний запас влаги, РВЗ – расход влаги из почвенного запаса, РВС – суммарный расход влаги, ОДВ – осенний дефицит влаги, НВ – наименьшая влагоемкость, ВЗ – влажность завядания.

Note. ПЗВ – spring increase in moisture reserve, ВЗВ – spring moisture reserve, ОЗВ – autumn moisture reserve, РВЗ – moisture consumption from the soil reserve, РВС – total moisture consumption, ОДВ – autumn moisture deficit, НВ – lowest moisture capacity, ВЗ – curl moisture.

Таким образом, осадки активного периода вегетации растений не вносят вклад в пополнение почвенных влагозапасов и могут быть определены как малоэффективные при оценке глубины промачивания почвы. Наиболее значимыми осадками, вносящими значительный вклад в пополнение весенних влагозапасов, являются осенние осадки (сентябрь – ноябрь), которые восполняют дефицит влаги, образующийся в конце предшествующего вегетационного сезона.

Климатическая норма осадков осеннего периода за последние 70 лет мало изменилась (табл. 2). Сохраняется четкая тенденция к частым сменам коротких серий – сухих и влажных.

Исходя из этих данных, можно предположить, что в ближайшем будущем изменения элементов баланса почвенной влаги будут соответствовать тенденциям, отмеченным Е.А. Афанасьевой в 1950–1952 гг. (Афанасьева, 1980). Можно ожидать, что в весенний период будет происходить максимальное промачивание почв, вынос карбонатов и легкорастворимых солей и других продуктов почвообразования до нижних горизонтов профиля. Наиболее частому промачиванию подвергается лишь самый верхний слой почвы, что и подтверждается материалами исследований.

Таким образом, анализ 120-летнего периода наблюдения за метеоэлементами (осадки и температура воздуха) выявил устойчивость климатической нормы, что стало главным фактором слабого изменения типоморфных характеристик, оставшихся в пределах параметров типа южного чернозема.

Среди антропогенных факторов временной изменчивости типоморфных характеристик выделены прямые и косвенные. К прямым были отнесены: регулярная механическая обработка почвы, изъятие из биологического круговорота вещества части растениеводческой продукции, внесение физиологически кислых химических удобрений. С последними связано подкисление почв, выявленное по данным исследования образцов 2021 г. отбора.

Косвенное антропогенное воздействие на почвы проявилось после создания ГЛП “Пенза-Каменск”. Произошло изменение гидрологического режима водораздельных территорий и ослабление дефляции под влиянием искусственного лесонасаждения (Афанасьева, 1980).

Длительное сельскохозяйственное использование не привело к преобразованию гумусово-аккумулятивного (черноземного) профилеобразующего процесса. В течение последующих 70 лет характер и степень прямого антропогенного воздействия существенно не изменились. С созданием полезащитных лесонасаждений и по мере роста деревьев возрастающее влияние на почвы стали оказывать лесополосы. К 2021 г. лесонасаждения достигли зрелости и, очевидно, максимального экологического эффекта по защите агроэкосистемы: ослабление воздействия на почву восточных ветров (суховеев), и за счет этого уменьшение испаряемости, увеличилось поступление влаги в почвы за счет снегозадержания. С этим связано более частое и глубокое промачивание почв. Индикатором этого явилось уменьшение за 70 лет содержание легкорастворимых солей в профиле и уменьшение содержания карбонатов.

Почвенно-зоологические исследования на трансекте выявили низкое видовое разнообразие и невысокую среднюю плотность макропедофауны (18.5 экз./м^2) в пахотных почвах по сравнению с лесными почвами. Оказалось, что основу почвенного населения пахотных почв составляют фитофаги, среди которых преобладают насекомые (Пятин, 2024). В связи с этим можно предполагать, что лесополосы, ставшие важным элементом агроэкосистем, будут фактором увеличения естественного биоразнообразия макропедофауны и его сохранения.

ВЫВОДЫ

Данные ретроспективного мониторинга, базирующиеся на точной пространственно-временной привязке образцов агрочерноземов, показали высокую устойчивость гумусово-аккумулятивного процесса почвообразования к длительному сельскохозяйственному использованию. Условиями для этого являются неизменность климатической нормы почвообразования, плоскоравнинный рельеф дренированного водораздела, почвозащитная роль искусственных лесонасаждений. Также следует отметить отсутствие негативных форм воздействия сельскохозяйственной деятельности на почвы. При сохранении характера колебаний годовых сумм осадков и температуры в пределах климати-

ческой нормы в ближайшие годы не произойдет существенных сдвигов в типоморфных характеристиках южных черноземов, используемых в сельскохозяйственном производстве, а, следовательно, его потенциального плодородия.

Исследования подтвердили, что типоморфные характеристики (морфогенетический, физический, химический профиль) являются хорошими индикаторами профилообразующего процесса. Принимая во внимание наличие обширных материалов комплексных исследований временной изменчивости агрочерноземов на бывшем стационаре АН СССР “Белые пруды” можно рекомендовать его использовать в качестве полигона долгосрочного почвенно-экологического мониторинга.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абакумов Е.В., Апарин Б.Ф., Лапенис А., Косаки Т. Изменение органического вещества типичного чернозема за 30 лет на основе изучения почвенного монолита // Вестник СПбГУ. Сер. 3. Вып. 2. 2009. С. 113–123.
2. Агрохимические методы исследования почв / под ред. А.В. Соколова. М.: Наука, 1975. 656 с.
3. Агроэкологическое состояние черноземов ЦЧО / под ред. А.П. Щербакова, И.И. Васенева. Курск, 1996. 380 с.
4. Апарин Б.Ф. Эволюционные модели плодородия почв. СПб.: Издательство Санкт-Петербургского университета, 1997. 292 с.
5. Апарин Б.Ф., Мингареева Е.В. Среднесрочные изменения агрегатного состава чернозема южного под влиянием лесонасаждений государственной лесополосы Пенза-Каменск // Известия Нижегородского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2024. № 1 (73). С. 31–42.
6. Апарин Б.Ф., Мингареева Е.В., Санжарова Н.И., Сухачева Е.Ю. Содержание радионуклидов (^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K , ^{137}Cs) в черноземах Волгоградской области разных сроков отбора образцов // Почвоведение. 2017. № 12. С. 1457–1467.
7. Апарин Б.Ф., Сухачева Е.Ю. Изменение ресурсного потенциала почв при разных уровнях антропогенного воздействия и глобального изменения климата // Современные проблемы изучения почвенных и земельных ресурсов: Сборник докладов Третьей Всероссийской открытой конференции. М.: Почвенный институт имени В.В. Докучаева, 2019. С. 225–231.

8. *Апарин Б.Ф., Сухачева Е.Ю.* Эволюция почв и почвенного покрова мелиорированных земель. СПб: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2009. 265 с.
9. *Афанасьева Е.А.* Водно-солевой режим обыкновенных и южных черноземов юго-востока Европейской части СССР. М.: Наука, 1980. 216 с.
10. *Афанасьева Е.А.* Черноземы среднерусской возвышенности. М.: Наука, 1966. 224 с.
11. *Апарин Б.Ф., Сухачева Е.Ю., Захарова М.К.* Влияние массивного полезайтнго лесонасаждения на содержание и запасы гумуса в черноземах // Почвоведение. 2024. № 12. С. 1785–1799. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0032180X24120087>.
12. *Беляков А.М.* Резервы роста производства зерна в Волгоградской области // Научно-агрономический журнал. 2019. № 2 (105). С. 27–29.
13. *Воробьева Л.А.* Теория и практика химического анализа почв. М.: ГЕОС, 2006. 400 с.
14. *Гурин П.Д., Апарин Б.Ф., Сухачева Е.Ю.* Влияние лесопосадок и длительного сельскохозяйственного использования на свойства южных черноземов // Вестник СПбГУ. Сер. 3. 2012. Вып. 2. С. 109–119.
15. Деградация и охрана почв / Под общей ред. акад. РАН Г.В. Добровольского. М.: Изд-во МГУ, 2002. 654 с.
16. *Дегтярева Е.Т., Жулидова А.Н.* Почвы Волгоградской области. Волгоград: Нижне-Волжское книжное издательство, 1979. 321 с.
17. *Егоров В.В., Иванова Е.Н., Фридланд В.М.* Классификация и диагностика почв СССР. М.: Колос, 1977. 221 с.
18. Засоленные почвы России / отв. ред. Л.Л. Шишов, Е.И. Панкова. М.: Академкнига, 2006. 853 с.
19. *Иванов А.Л., Лебедева И.И., Гребенников А.М.* Факторы и условия антропогенной трансформации черноземов, методология изучения эволюции почвообразования // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2013. Вып. 72. С. 26–46. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2013-72-26-46>.
20. *Карманов И.И., Булгаков Д.С.* Методика почвенно-агроклиматической оценки пахотных земель для кадастра. М.: ГНУ Почвенный ин-т им В.В. Докучаева Россельхозакадемии, 2012. 119 с.
21. *Кирюшин В.И.* Экологические основы земледелия. М.: КолосС, 1996. 368 с.
22. *Крупеников И.А.* Черноземы. Возникновение, совершенство, трагедия, деградации, пути охраны и возрождения. Кишинев: Pontos, 2008. 285 с.
23. *Мингареева Е.В., Захарова М.К.* Использование биоресурсной коллекции почвенных монолитов и образцов как основы ретроспективного мониторинга // Почвы – опора России. Тезисы

докладов IX съезда Общества почвоведов им. В.В. Докучаева. 2024. С. 495–496.

24. Научные основы предотвращения деградации почв (земель) сельскохозяйственных угодий России и формирования систем воспроизводства их плодородия в адаптивно-ландшафтном земледелии: Т. 1. Теоретические и методические основы предотвращения деградации почв (земель) сельскохозяйственных угодий / *А.Л. Иванов и др. Э.Н. Молчанов* (отв. ред.). М., 2013. 756 с.

25. Национальный атлас России. Т. 2. Природа и экология / *Клочко А.А., Романовская М.А. и др.* М: ФГУП “Госгисцентр”, 2004. 495 с.

26. Погода и климат: климат Рудни. URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/history/34262.htm>.

27. *Пономарева В.В., Плотникова Т.А.* Гумусовый профиль // Черноземы СССР. Т. 1. М.: Колос, 1974. С. 122–145.

28. *Приходько В.Е., Чевердин Ю.И., Чевердин А.Ю.* Изучение почв Каменной степи в течение 130 лет // Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием “Почва как компонент биосферы: актуальные проблемы в условиях изменений климата”, Пушкино, 2024. С. 148–149.

29. *Пятина Е.В.* Структура фауны крупных почвенных беспозвоночных агроэкосистем и искусственных зеленых насаждений волгоградской области // Почвы – опора России. Тезисы докладов IX съезда Общества почвоведов им. В.В. Докучаева, 2024. С. 495–496.

30. *Растворова О.Г.* Физика почв (практическое руководство). Л.: Изд-во Ленинград. Ун-та, 1983. 195 с.

31. *Растворова О.Г., Андреев Д.П., Гагарина Э.И., Касаткина Г.А.* Химический анализ почв. СПб: Изд-во Санкт-Петербургского ун-та, 1995. 264 с.

32. Руководящие указания ВМО по расчету климатических норм. Всемирная метеорологическая организация. 2017. № 1203. С. 18–21.

33. *Сажин А.Н., Кулик К.Н., Васильев Ю.И.* Погода и климат Волгоградской области. Волгоград: ФНЦ агроэкологии РАН, 2017. 334 с.

34. *Семенов В.М., Козут Б.М.* Почвенное органическое вещество. Москва: ГЕОС, 2015. 232 с.

35. Химический анализ почв / *Л.А. Воробьева*. М.: Изд-во МГУ, 1998. 271 с.

36. *Холодов В.А., Ярославцева Н.В., Фарходов Ю.Р., Белобров В.П., Юдин С.А., Айдиев А.Я., Лазарев В.И., Фрид А.С.* Изменение соотношения фракций агрегатов в гумусовых горизонтах черноземов в различных условиях землепользования // Почвоведение. 2019. № 2. С. 184–193.

37. Чевердин Ю.И., Беспалов В.А., Титова Т.В. Динамика содержания гумуса черноземных почв каменной степи // Теоретические и прикладные аспекты современной науки. 2015. № 8–2. С. 86–88.
38. Щеглов Д.И. Черноземы центра Русской равнины и их эволюция под влиянием естественных и антропогенных факторов: Автореф. дис. ... д. б. шн.: 03.00.27. Воронеж, 1995. 46 с.
39. Щербаков А.П., Васенев И.И. Русский чернозем на рубеже веков // Антропогенная эволюция черноземов. Воронеж: Воронежский государственный университет, 2000. С. 32–67.

REFERENCES

1. Abakumov E.V., Aparin B.F., Lapenis A., Kosaki T., Changes in the organic matter of typical chernozem over 30 years based on the study of the soil monolith, *Vestnik of Saint-Petersburg University. Earth Sciences*, Ser. 3, Vol. 2, 2009, pp. 113–123. (In Russ.)
2. Sokolov A.V., *Agrochemical methods of soil research*, Moscow: Nauka, 1975, 656 p. (In Russ.)
3. Shherbakova A.P., Vaseneva I.I., *Agroecological state of chernozems of the Central Agricultural District*, Kursk, 1996, 380 p. (In Russ.)
4. Aparin B.F., *Evolutionary models of soil fertility*, Saint Petersburg: Izdatel'stvo Sankt-Peterburgskogo universiteta, 1997, 292 p. (In Russ.)
5. Aparin B.F., Mingareeva E.V., Medium-term changes in the aggregate composition of the southern chernozem under the influence of afforestation of the Penza-Kamensk, *Izvestia of the Lower Volga Agro-University Complex*, 2024, No. 1 (73), pp. 31–42. (In Russ.)
6. Aparin B.F., Mingareeva E.V., Sukhacheva E.Y., Sanzharova N.I., Concentrations of radionuclides (^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K , and ^{137}Cs) in chernozems of Volgograd oblast sampled in different years, *Eurasian Soil Science*, 2017, Vol. 50, No. 12, pp. 1395–1405.
7. Aparin B.F., Suhacheva E.Ju., Changes in the resource potential of soils at different levels of anthropogenic impact and global climate change, In: *Modern problems of studying soil and land resources*, Book of abstracts, Moscow, 2019, pp. 225–231. (In Russ.)
8. Aparin B.F., Suhacheva E.Ju., *Evolution of soils and soil cover of reclaimed lands*, Saint Petersburg: Izd-vo S.-Peterb. un-ta, 2009, 265 p. (In Russ.)
9. Afanas'eva E.A., The water-salt regime of ordinary and southern chernozems of the south-east of the European part of the USSR, Moscow: Nauka, 1980, 216 p. (In Russ.)

10. Afanas'eva E.A., *Chernozems of the Central Russian upland*, Moscow: Nauka, 1966, 224 p. (In Russ.)
11. Aparin B.F., Sukhacheva E.Yu., Zakharova M.K., Mingareeva E.V., Koshelev A.V. Effect of massive forest shelterbelts on humus content and stock in chernozems, *Eurasian Soil Science*, 2024, Vol. 57, No. 12, pp. 2068–2080, DOI: <https://doi.org/10.31857/S0032180X24120087>.
12. Belyakov A.M., Reserves of grain production growth in the Volgograd region, *Scientific Agronomy Journal*, 2019, No. 2 (105), pp. 27–29. (In Russ.)
13. Vorob'eva L.A., *Theory and practice of chemical analysis of soils*, Moscow: GEOS, 2006, 400 p. (In Russ.)
14. Gurin P.D., Aparin B.F., Sukhacheva E.Yu., Influence of forest plantations and long agricultural use on properties of southern chernozems, *Vestnik of Saint-Petersburg University. Earth Sciences*, Ser. 3, Vol. 2, 2012, pp. 109–119. (In Russ.)
15. Dobrovol'skii G.V., *Soil degradation and protection*, Moscow: Izd-vo MGU, 2002. 654 p. (In Russ.)
16. Degtyareva E.T., Zhulidova A.N., *Soils of the Volgograd region*, Volgograd: Nizhne-Volzhskoe knizhnoe izdatel'stvo, 1979, 321 p. (In Russ.)
17. Egorov V.V., Ivanova E.N., Fridland V.M., *Classification and diagnostics of soils of the USSR*, Moscow: Kolos, 1977, 221 p. (In Russ.)
18. Shishov L.L., Pankov E.I., *Saline soils of Russia*, Moscow: Akademkniga, 2006, 853 p. (In Russ.)
19. Ivanov A.L., Lebedeva I.I., Grebennikov A.M., Factors for anthropogenic transformation of chernozems, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2013, Vol. 72, pp. 26–46, DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2013-72-26-46>. (In Russ.)
20. Karmanov I.I., Bulgakov D.S., *Methodology of soil and agro-climatic assessment of arable lands for the cadastre*, Moscow: GNU Pochvennyi in-t im V. V. Dokuchaeva Rossel'khozakademii, 2012, 119 p. (In Russ.)
21. Kiryushin V.I., *Ecological foundations of agriculture*, Moscow: KolosS, 1996, 368 p. (In Russ.)
22. Krupenikov I.A., *Emergence, perfection, tragedy, degradation, ways of protection and rebirth*, Kishinev: Pontos, 2008, 285 p. (In Russ.)
23. Mingareeva E.V., Zakharova M.K., The use of a bioresource collection of soil monoliths and samples as the basis for retrospective monitoring, *In: Soils are the Backbone of Russia*, Book of Abstracts, 2024, pp. 495–496. (In Russ.)
24. Ivanov A.L., et al. E.N. Molchanov (Editors-in-chief), *Scientific foundations for preventing degradation of soils (lands) of agricultural lands in Russia and the formation of systems for reproducing their fertility in adaptive landscape agriculture: Vol. 1. Theoretical and methodological foundations for*

preventing degradation of soils (lands) of agricultural lands, Moscow, 2013, 756 p. (In Russ.)

25. Klochko A.A., Romanovskaya M.A., National Atlas of Russia. Vol. 2. (Nature and ecology), Moscow: FGUP "Gosgistsentr", 2004, 495 p. (In Russ.)

26. Weather and climate: Rudnya climate, URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/history/34262.htm>. (In Russ.)

27. Ponomareva V.V., Plotnikova T.A., The humus profile, *In: Chernozems of the USSR*, Vol. 1, Moscow: Kolos, 1974, pp. 122–145. (In Russ.)

28. Prikhod'ko V.E., Cheverdin Yu.I., Cheverdin A.Yu., Studying the soils of the Stone Steppe for 130 years, "Soil as a Component of the Biosphere: Current Problems in the Context of Climate Change", Pushchino, 2024, Book of Abstracts, pp. 148–149. (In Russ.)

29. Pyatina E.V., Fauna structure of large soil invertebrates of agroecosystems and artificial green spaces of the Volgograd region, *In: Soils are the Backbone of Russia*, 2024, Book of Abstracts, pp. 281–282. (In Russ.)

30. Rastvorova O.G., *Physics of soils (practical guide)*, Leningrad: Izd-vo Leningrad. Un-ta, 1983, 195 p. (In Russ.)

31. Rastvorova O.G., Andreev D.P., Gagarina E.I., Kasatkina G.A., *Chemical analysis of soils*, Saint Petersburg: Izd-vo Sankt-Peterburgskogo un-ta, 1995, 264 p. (In Russ.)

32. *WMO Guidelines for calculating climate standards. World Meteorological Organization*, 2017, No. 1203, pp. 18–21. (In Russ.)

33. Sazhin A.N., Kulik K.N., Vasil'ev Yu.I., Weather and climate of the Volgograd region, Volgograd: FNTs agroekologii RAN, 2017, 334 p. (In Russ.)

34. Semenov V.M., Kogut B.M., *Soil organic matter*, Moscow: GEOS, 2015, 232 p. (In Russ.)

35. Vorob'eva L.A., *Chemical analysis of soils*, Moscow: Izd-vo MGU, 1998, 271 p. (In Russ.)

36. Kholodov V.A., Yaroslavtseva N.V., Farkhodov Yu.R., Belobrov V.P., Yudin S.A., Aidiev A.Ya., Lazarev V.I., Frid A.S., Changes in the ratio of aggregate fractions in humus horizons of chernozems in response to the type of their use, *Eurasian Soil Science*, 2019, Vol. 52, No. 2, pp. 162–170. (In Russ.)

37. Cheverdin Yu.I., Bepalov V.A., Titova T.V., Dynamics of humus content of chernozem soils of the stone steppe, *Theoretical and applied aspects of modern science*, 2015, No. 8–2, pp. 86–88. (In Russ.)

38. Shcheglov D.I., Chernozems of the center of the Russian plain and their evolution under the influence of natural and anthropogenic factors, Extended abstract of Dr. Biol. Sci. thesis, Voronezh, 1995, 46 p. (In Russ.)

39. Shcherbakov A.P., Vasenev I.I., Russian chernozem at the turn of the century, In: *Antropogenic evolution of chernozems*, Voronezh: Voronezhskii gosudarstvennyi universitet, 2000, pp. 32–67. (In Russ.)

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2026-128-85-117



Cite this article as:

Ariyanto D., Sucipto C.A., Febriani S., Widijanto H., Himmi S., Tarmadi D., Wikantyoso B., Zaki M., Komariah K., Sumani S., The potential of termite activity to enhance soil organic carbon and nutrient content in Alas Bromo, Karanganyar, Dokuchaev Soil Bulletin, 2026, V. 128, pp. 85-117, DOI: 10.19047/0136-1694-2026-128-85-117

Ссылки для цитирования:

Ariyanto D., Sucipto C.A., Febriani S., Widijanto H., Himmi S., Tarmadi D., Wikantyoso B., Zaki M., Komariah K., Sumani S. Потенциальное влияние активности термитов на повышение содержания органического углерода и питательных веществ в почве в районе Алас Бромо, Каранганьяр // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2026. Вып. 128. С. 85-117. DOI: 10.19047/0136-1694-2026-128-85-117

Conflict of Interest:

The Authors declare that there is no conflict of interest.

Author's Contribution Statements:

DP, CW and SR executed field and laboratory analyses, KH, DT and BW executed termite analyses, HW, MK, Kom and Sum conceived the idea.

Acknowledgments:

We would like to acknowledge to express their sincere gratitude to the Institute for Research and Community Service (LPPM), Universitas Sebelas Maret (UNS), for funding this research through the UNS Excellence Research Scheme (Hibah Non-APBN Penelitian Unggulan UNS) under Contract No. 369/UN27.22/PT.01.03/2025.

The potential of termite activity to enhance soil organic carbon and nutrient content in Alas Bromo, Karanganyar

© 2026 D. Ariyanto^{1*}, C. A. Sucipto¹, S. Febriani¹, H. Widijanto^{1**}, S. Himmi^{2***}, D. Tarmadi^{2****}, B. Wikantyoso^{2*****}, M. Zaki^{3*****}, K. Komariah^{1*****}, S. Sumani^{1*****}

¹*Universitas Sebelas Maret*,

Jl. Ir. Sutami 36a Surakarta, Central Java 57126, Indonesia,

*<https://orcid.org/0000-0001-6605-9599>, e-mail: dp_ariyanto@staff.uns.ac.id,

**<https://orcid.org/0000-0002-1781-7004>,

***** <https://orcid.org/0000-0001-7704-0754>,
***** <https://orcid.org/0000-0002-7488-2478>.

²National Research and Innovation Agency (BRIN),
Jl. Raya Bogor Km 46, Cibinong, Bogor 16911, Indonesia,

**** <https://orcid.org/0000-0003-2702-4208>,
**** <https://orcid.org/0000-0003-0791-4457>,
***** <https://orcid.org/0000-0002-5738-4004>.

³Universitas Gadjah Mada,
Jl. Flora, Bulaksumur, Sleman, Yogyakarta 55281, Indonesia,
***** <https://orcid.org/0000-0002-9597-9076>.

Received 14.07.2025, Revised 05.02.2026, Accepted 29.04.2026

Abstract: Termites are increasingly recognized as key ecosystem engineers with critical roles in regulating soil processes and nutrient cycling, particularly in tropical forest ecosystems. This study investigates the functional role of termite activity in influencing soil organic carbon (SOC) and essential macronutrients (N, P, K) under different vegetation stands within the Alas Bromo Educational Forest, Central Java, Indonesia. Employing a wood stake baiting method within PVC tubes, termite activity was quantified and classified into five damage classes. Sampling was conducted during both dry and rainy seasons across pine and mahogany stands of various ages, with subsequent analysis of soil samples for SOC, total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), total potassium (TK), and soil microbial biomass carbon (SMBC). Findings revealed significant seasonal and stand-type variation in termite diversity and activity, with higher termite abundance and diversity observed during the dry season, particularly in pine stands, which also exhibited higher palatability. Increased termite activity, as reflected by higher stake damage classes, was strongly associated with elevated levels of SOC, TN, TP, TK, and SMBC. Pearson correlation analysis confirmed positive and significant correlation between termite activity and each of the soil parameters studied, with the strongest correlation observed between termite activity and TN ($r = 0.771$) and SMBC ($r = 0.487$). These findings highlight the biological contributions of termites to soil fertility, mediated through mechanisms such as organic matter decomposition, bioturbation, and nutrient mineralization facilitated by symbiotic gut microbiota. The results demonstrate that termite activity not only enhances SOC content through stoichiometric shifts but also promotes nutrient accumulation, particularly under conditions of high wood consumption. Furthermore, the microbial biomass carbon content was significantly higher in areas with active termite presence, indicating synergistic effects between macrofauna and microbial communities in

regulating soil carbon dynamics. This study underscores the ecological significance of termites in sustainable forest management and their potential utilization as bioindicators of soil health.

Keywords: Alfisols; Isoptera; bioturbator; soil fertility, bioindicator.

Потенциальное влияние активности термитов на повышение содержания органического углерода и питательных веществ в почве в районе Алас Бромо, Каранганьяр

Резюме: Термиты все чаще рассматриваются как ключевые экосистемные инженеры, играющие решающую роль в регулировании почвенных процессов и круговорота питательных веществ, особенно в тропических лесных экосистемах. В данном исследовании изучается функциональная роль активности термитов в воздействии на содержание почвенного органического углерода (ПОУ) и основных макроэлементов (N, P, K) в различных типах растительности в пределах учебного стационара в лесу Алас Бромо, Центральная Ява, Индонезия. С помощью метода приманки из деревянных кольев в ПВХ-трубках активность термитов была количественно оценена и разделена на пять классов по степени повреждений. Отбор проб проводился как в сухой, так и в дождливый сезоны, в сосновых и красnodревесных насаждениях различного возраста, с последующим анализом образцов почвы на содержание ПОУ, общего азота (N_{total}), общего фосфора (P_{total}), общего калия (K_{total}) и углерода микробной биомассы почвы. Результаты показали значительные сезонные колебания и различия в разнообразии и активности термитов в зависимости от типа насаждений, при этом более высокая численность и разнообразие термитов наблюдались в сухой сезон, особенно в сосновых насаждениях, которые также демонстрировали более высокую привлекательность для термитов. Повышенная активность термитов, проявившаяся в более высоких классах повреждений кольев, была тесно связана с повышенными уровнями ПОУ, общего азота, фосфора и калия, а также углерода микробной биомассы почвы. Корреляционный анализ Пирсона подтвердил положительную и значимую корреляцию между активностью термитов и каждым из изученных параметров почвы, при этом наиболее сильная корреляция наблюдалась между активностью термитов и содержанием общего азота ($r = 0.771$) и углерода микробной биомассы почвы ($r = 0.487$). Эти результаты подчеркивают биологический вклад термитов в плодородие почвы, опосредованный

такими механизмами, как разложение органического вещества, биотурбация и минерализация питательных веществ, облегчаемая симбиотической кишечной микробиотой. Результаты показывают, что активность термитов не только повышает содержание ПОУ за счет стехиометрических сдвигов, но и способствует накоплению питательных веществ, особенно в условиях интенсивного потребления древесины. Кроме того, содержание углерода в микробной биомассе было значительно выше в районах с активным присутствием термитов, что указывает на синергетический эффект между макрофауной и микробными сообществами в регулировании динамики углерода в почве. Данное исследование подчеркивает экологическое значение термитов в устойчивом управлении лесами и их потенциальное использование в качестве биоиндикаторов состояния почвы.

Ключевые слова: Alfisols; отряд Изоптеры; биотурбатор; плодородие почвы; биоиндикатор.

INTRODUCTION

Termites are eusocial insects belonging to the order Isoptera, and their colonies are widely distributed (Eggleton, 2000). Termites were previously recognized as pests due to their frequent damage to wood, particularly in plantation areas. However, despite their reputation as pests termites play in an important ecological role as “ecosystem engineers” (Jouquet et al., 2006) because their activities influence soil processes, structural properties, and hydrology, thereby enhancing nutrient availability and contributing to the decomposition of organic matter (Maynard et al., 2015; Myer, Forschler, 2019). The contribution of termites as decomposition agents plays a crucial role in maintaining soil fertility and health, thereby supporting sustainable agricultural practices (Khan et al., 2018). Their contribution to the carbon cycle includes the breakdown of dead organic matter, bioturbation, and the digestion of lignocellulose (Bignell et al., 2011).

Wood decomposition by termites is relatively greater than that by soil microorganisms, indicating that termites play a significant role in wood decay and may act as key agents in nutrient and carbon cycling (Vasconcellos, 2010; Griffiths et al., 2019). This carbon cycle is crucial for maintaining nutrient availability within the environment. Soil organic carbon (SOC) is an essential component of forest soils and ecosystems. The accumulation and decomposition of SOC have a sig-

nificant influence on carbon sequestration and overall carbon stability within ecosystems (Joshi et al., 2021).

Environmental factors contribute to termite populations (Eggleton, 2000), one of which is the difference in tree stand types, which can influence environmental conditions and soil fertility, particularly the topsoil layer (Augustoa et al., 2007). This will impact the diversity of termite populations (Mugerwa et al., 2011). A study in Malawi demonstrated that stand conditions directly impact termite distribution across a landscape (Nyirenda et al., 2019). This is related to the litter conditions, de Jonge et al. (2024), reported that termites exhibit a preference for litter with a high content of secondary metabolites, such as phenolics and tannins, which can enhance litter decomposition. Stand type also influence termite preferences, with stands such as rubber (Arinana et al., 2022), pine (Waller et al., 1990), and oil palm being examples among the types of stands that are potentially preferred by termites (Risky et al., 2024).

The presence and activity levels of termites are also influenced by seasonal conditions. Several studies have shown that termite populations tend to be higher during the dry season compared to the rainy season, primarily due to increased foraging activity, as observed in termite genera such as *Odontotermes* sp. (Wale, Nega, 2019). However, other studies have reported contrasting findings. For example, research conducted by (Kanyi et al., 2021), indicated that in Embu County, seasonality had a significant effect on termites abundance (*Macrotermes subhyalinus*, *Macrotermes herus*, and *Coptotermes formosanus*), with higher numbers observed during the rainy season.

Research on termites has generally focused on mound soils. However, specific and comprehensive studies employing the wood stake baiting method within PVC pipes, which reflects termite activity levels, have not yet been conducted. Therefore, this study was carried out in the Alas Bromo Educational Forest across pine and mahogany stands of various ages. The objectives of this research were to analyze termite diversity and to assess their activity levels using the wood stake baiting method in pipes. Furthermore, the study aimed to evaluate the role of termites in the provision of soil organic carbon and essential nutrients (N, P, K) under pine and mahogany stands in Alas Bromo, and to compare the effects of termite activity levels on soil characteris-

tics during the dry and rainy seasons in each stand type.

MATERIALS AND METHODS

Study site. The study was conducted in pine and mahogany stands within the Alas Bromo Educational Forest Area, Karanganyar, Central Java, Indonesia, from July to December 2024. The predominant soil order in this area is classified as Alfisols (Ariyanto et al., 2022). Soil analysis was carried out at the Soil Chemistry and Fertility Laboratory, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Universitas Sebelas Maret, Surakarta. The research sites were selected using a descriptive exploratory method with a purposive sampling approach, focusing on stands suspected to exhibit high termite activity

Termite sampling design and identification. The presence and activity level of termites were measured using the wood stake baiting method installed within PVC pipes, with four replications in each stand. The type of wood bait was adjusted to the stand type, namely mahogany wood for mahogany stands and pine wood for pine stands, to match the dominant wood conditions in each stand. The bait installation area measured 25 meters $\times$ 25 meters, with a distance of 10 meters between replications within each stand and 2.5 meters between individual bait stakes (Fig. 1).

This research was conducted using a descriptive-exploratory approach, incorporating survey-based variables and supported by laboratory analyses. Termite identification was performed through direct field observation and subsequently confirmed via microscopic examination.

Soil chemical properties. Three types of soil samples were collected in this study (a) control soil: soil collected from each stand with four replications, obtained prior to the installation of bait stakes. (b) stake soil: soil collected based on the stake damage class in each stand (sampled two weeks after stake installation), with samples taken from each replication. (c) termite-formed soil: soil produced by termite activity within the PVC pipe.

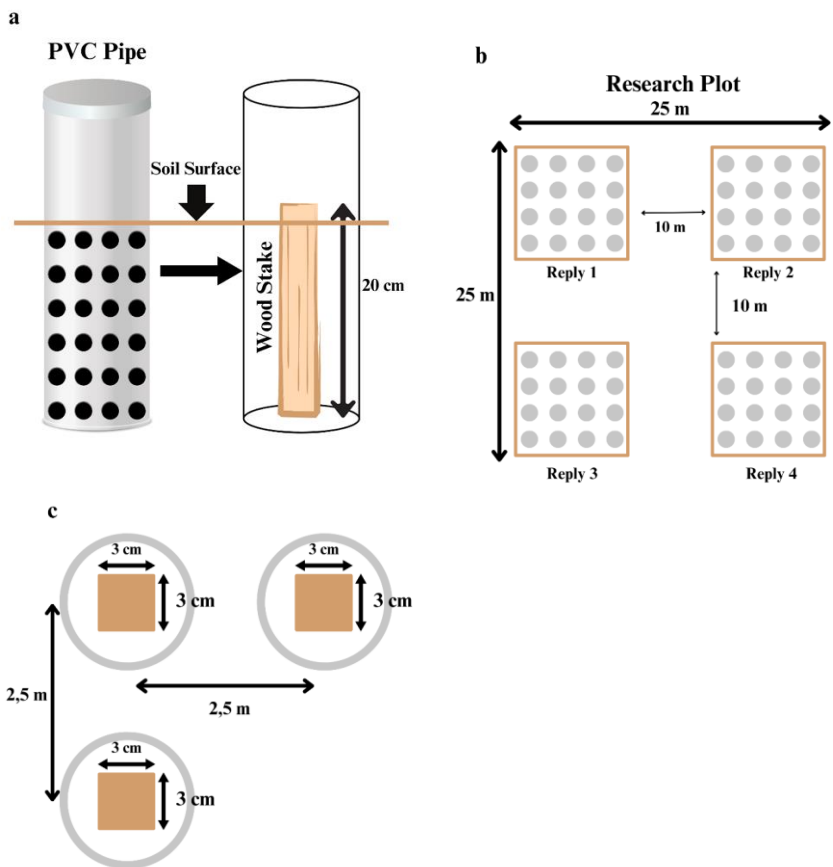


Fig. 1. Design of the stake installation for termite activity assessment.
Note. (a) The PVC unit used in the experiment. (b) Top view of the research plot within each stand. (c) Distance between each installed PVC unit.

Two weeks after the installation of the wood stake baits, observations were conducted to assess and classify the level of damage based on specific criteria (Table 1). The damage class of each stake reflects the level of termite activity, the higher the damage class, the greater the termite activity at that location. Observations also included

the identification of termite genera found on each stake. In addition, soil samples were collected for laboratory analysis to determine soil organic carbon (SOC), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), and total potassium (TK) content. There are five damage classes, as outlined in the damage classification table below.

Table 1. Classes and criteria of damage to wooden stakes used to assess termite activity

Damage Class	Damage Level	Damage Criteria for Stakes
Class 0	Undamaged	No termites and attack marks were found
Class 1	Minor Damaged	There were traces of termite infestation on the stake, but no termites were found
Class 2	Moderately Damaged	There was damage to the stake due to termite attacks and deeper attack holes
Class 3	Major Damaged	There was damage to the stake which was quite severe and the attack was deep
Class 4	Severely Damaged	Very severe damage to stake (deep and thorough) or the stake disappeared (was fully consumed), in the latter case termites are no longer active

Note. Visual Tree Assessment (VTA) International Society of Arboriculture on Rachmadiyanto et al. (2023).

Data analysis. Data analysis was conducted to determine the effect of stake damage classes, which reflect the level of termite activity, on soil characteristic properties. The analysis was performed using analysis of variance (ANOVA) at a 95% significance confidence level, followed by Duncan’s Multiple Range Test (DMRT) at a 5% significance level to compare the parameter values among damage classes (levels of termite activity) within each stand. The strength of the relationships between parameters was further examined using Pearson’s correlation analysis.

Termite diversity in each stand was measured using the Shannon-Wiener Diversity Index (Spellerberg, Fedor, 2003; Soetignya et al., 2021).

$$H' = -(\sum_{i=1}^n P_i \times \ln P_i)$$

Description:

- H' : Shannon-Wiener Diversity Index.
- P_i : The proportion of species “i” to the total species
- ln : Normal logarithm
- n : Number of individual species
- N : Total number off all species

The criteria for interpreting the Shannon-Wiener diversity index (H') are as follows: H' < 1 = low diversity; 1 < H' < 3 = moderate diversity; and H' > 3 = high diversity.

RESULTS AND DISCUSSION

Termite diversity index in Alas Bromo during dry and rainy seasons. The termite diversity index was calculated using the Shannon-Wiener Diversity Index formula. The results of the macrofauna diversity index calculations across the six stands are presented in Figure 2. Several termite genera identified in this study include *Macrotermes* sp., *Microtermes* sp., *Schedorhinotermes* sp., and *Odontotermes* sp. Significant differences in termite diversity indices were observed among the stands in each season.

Based on diversity index criteria, the Alas Bromo exhibits a low to moderate level of termite diversity. During the dry season, the pine stands showed a moderate diversity level, with the highest index observed in the 2001 pine stand (H' = 2.52), which was significantly different from the other stands. The lowest diversity index was recorded in the 1973 mahogany stand (H' = 0.56), classified as low. In the rainy season, significant differences in diversity indices were also observed among stands. A moderate diversity level was found in the 1973 mahogany, 1973 pine, 2016 pine, and 2001 pine stands, with the highest value recorded in the 1973 mahogany stand (H' = 2.6), which was significantly different from the other stands. Low diversity indices during the rainy season were observed in the 1949 mahogany and 1994 pine stands, with the lowest recorded in the 1949 mahogany stand (H' = 0.35).

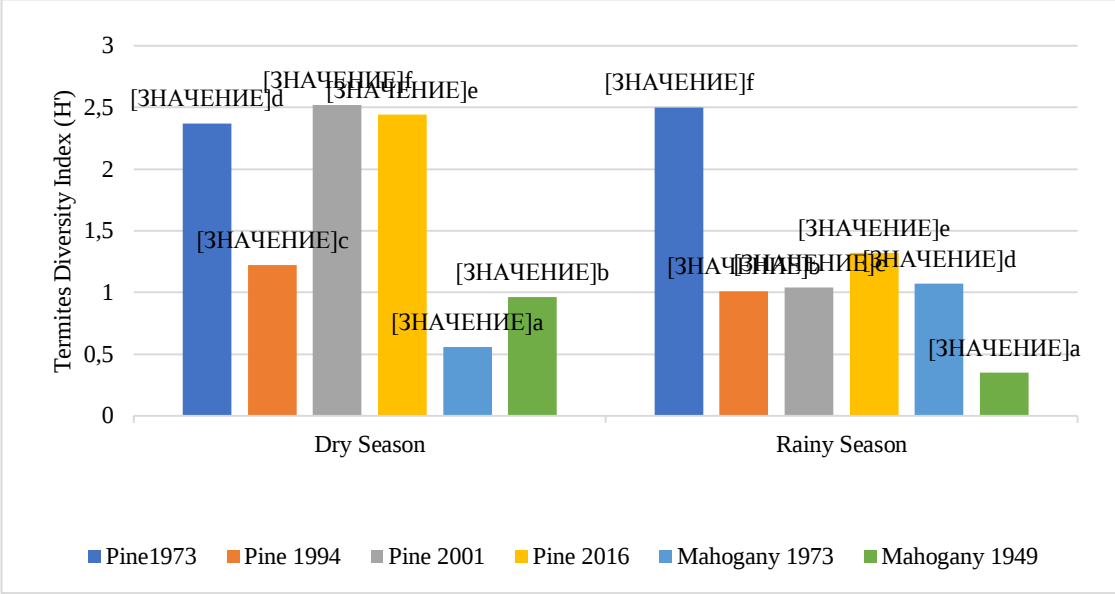


Fig. 2. Termite diversity index in Alas Bromo during dry and rainy seasons.

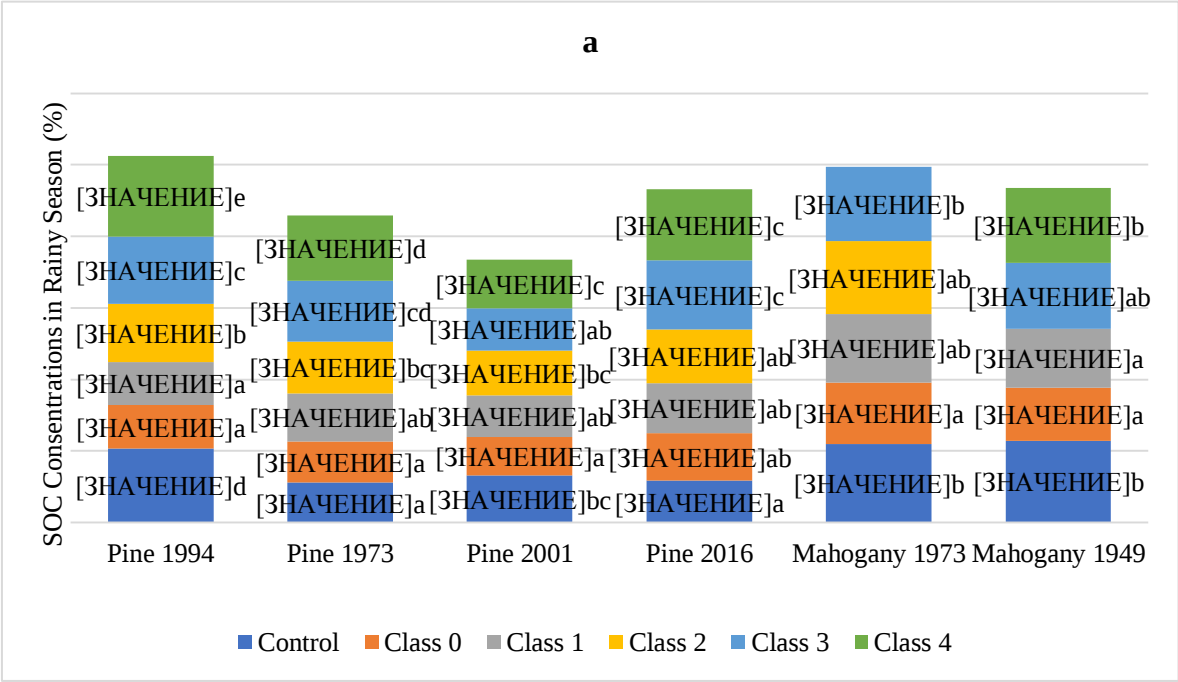
Note. Means followed by the same letter are not significantly different according to DMRT at $P < 0.05$.

SOC content based on termite activity levels in different stands types at Alas Bromo. In general, nutrient content tends to decrease during the rainy season, which may be attributed to reduced termite activity during this period (Fig. 3). This is further supported by the absence of termite-formed soil within tunnels formed in the wood during the rainy season (Fig. 3).



Fig. 3. Soil structures formed by termites during dry season in Alas Bromo.

The highest SOC content was generally observed in stake damage class 4, both during the dry and rainy seasons, as seen in Pine 1994 (2.49% and 2.25%), Pine 1973 (1.48% and 1.82%), Pine 2001 (1.81% and 1.36%), and Pine 2016 (1.70% and 1.98%). In the mahogany 1973, the highest SOC content during the dry season was also recorded in stake damage class 4 (2.54%); however, during the rainy season, class 4 was not present in this stand, and the highest value was instead found in class 3 (2.08%). Stake damage classes 3 and 4 were not observed in the mahogany 1949 during the dry season, with the highest SOC content recorded in class 2 (3.40%). In contrast, during the rainy season, only class 2 was absent, and the highest SOC content was found in class 4 (2.10%). The lowest SOC contents tended to occur in stake damage class 0 and the control soils, regardless of the season (Fig. 4).



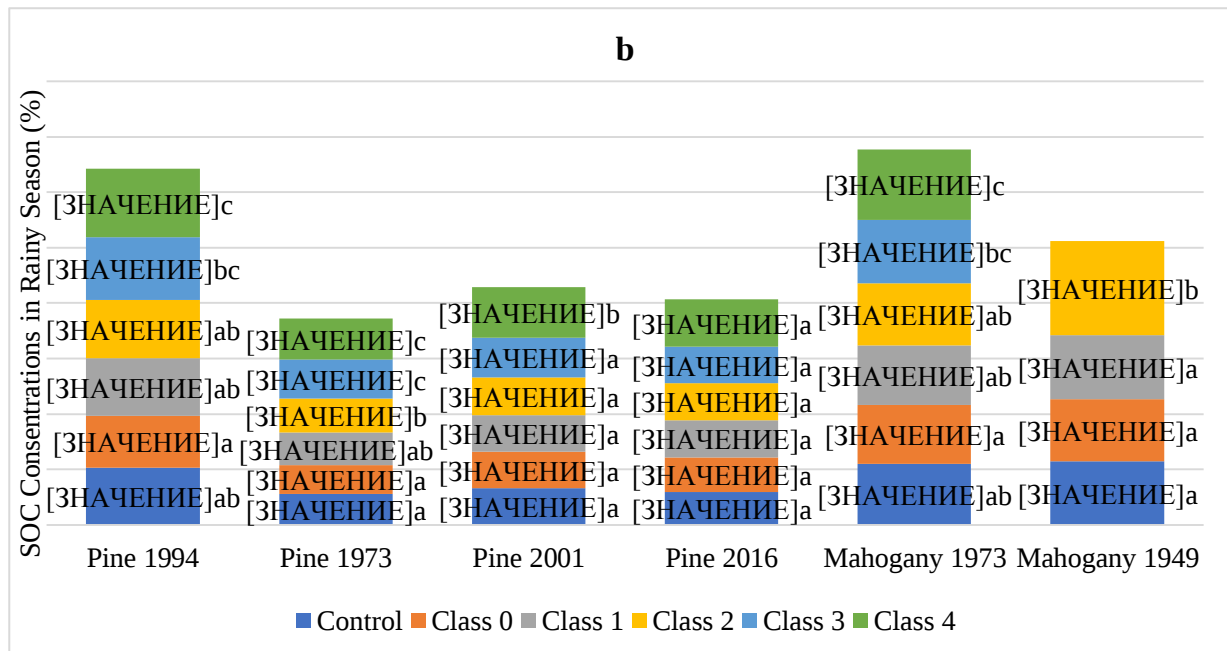
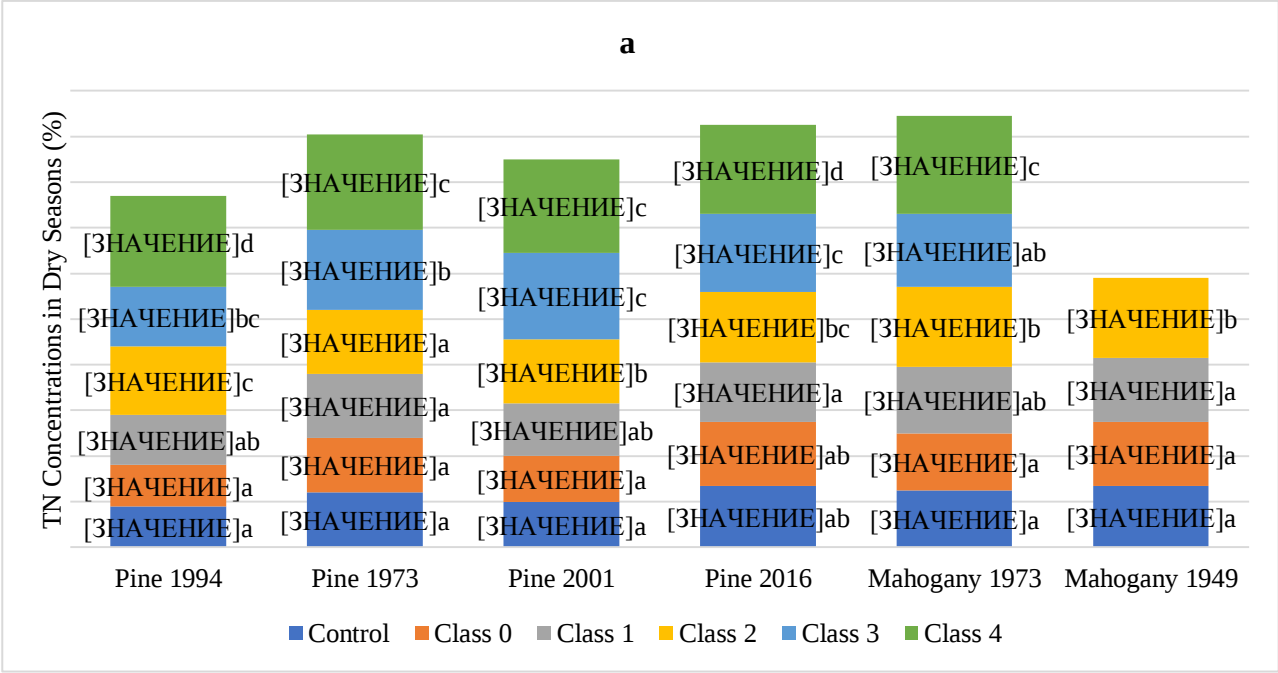


Fig. 4. SOC content based on termite activity levels across different stands during (a) dry and (b) rainy seasons.
Note. Means followed by the same letter are not significantly different according to DMRT at $P < 0.05$;
(a) SOC concentration in dry season; (b) SOC concentration in rainy season.

Nutrient content (NPK) based on termite activity levels in different stand types at Alas Bromo. Similar to SOC, the total nutrient content (NPK) in the soil tends to decrease during the rainy season, which may be attributed to the reduced termite activity during this period (Fig. 5).

The TN content in the soil also showed significant differences among stake damage classes within each stand. In the Pine 1994, Pine 1973, Pine 2001, and Pine 2016 Pinus, the highest nitrogen content was observed in stake damage class 4, both during the dry season (0.4%, 0.42%, 0.41%, 0.39%) and the rainy season (0.36%, 0.42%, 0.38%, 0.33%). In Mahogany 1973, the highest value during the dry season was also recorded in stake damage class 4 (0.43%), while during the rainy season, it was found in stake damage class 3 (0.38%). In Mahogany 1949, the highest value during the rainy season was observed in stake damage class 2 (0.35%), while during the dry season, it was recorded in stake damage class 4 (0.39%). The lowest values in each stand were generally observed in stake damage class 0 and control soils (Fig. 5).

The analysis showed that the highest TP content during both the dry and rainy seasons in pine stands was consistently found in stake damage class 4, namely in Pine 1994 (4.84 mg 100 g⁻¹ and 4.24 mg 100 g⁻¹), Pine 1973 (7.63 mg 100 g⁻¹ and 4.31 mg 100 g⁻¹), Pine 2001 (7.22 mg 100 g⁻¹ and 4.72 mg 100 g⁻¹), and Pine 2016 (12.91 mg 100 g⁻¹ and 4.91 mg 100 g⁻¹). In Mahogany 1973, the highest value during the dry season was also recorded in stake damage class 4 (12.15 mg 100 g⁻¹), while during the rainy season it occurred in stake damage class 3 (5.52 mg 100 g⁻¹). In Mahogany 1949, the highest phosphorus content during the dry season was found in stake damage class 2 (4.53 mg 100 g⁻¹), and during the rainy season in stake damage class 4 (4.12 mg 100 g⁻¹). The lowest values across all stands tended to be found in stake damage class 0 and in control soils. Although values during the rainy season were more variable, the highest phosphorus content was still generally associated with stake damage class 4 (Fig. 6).



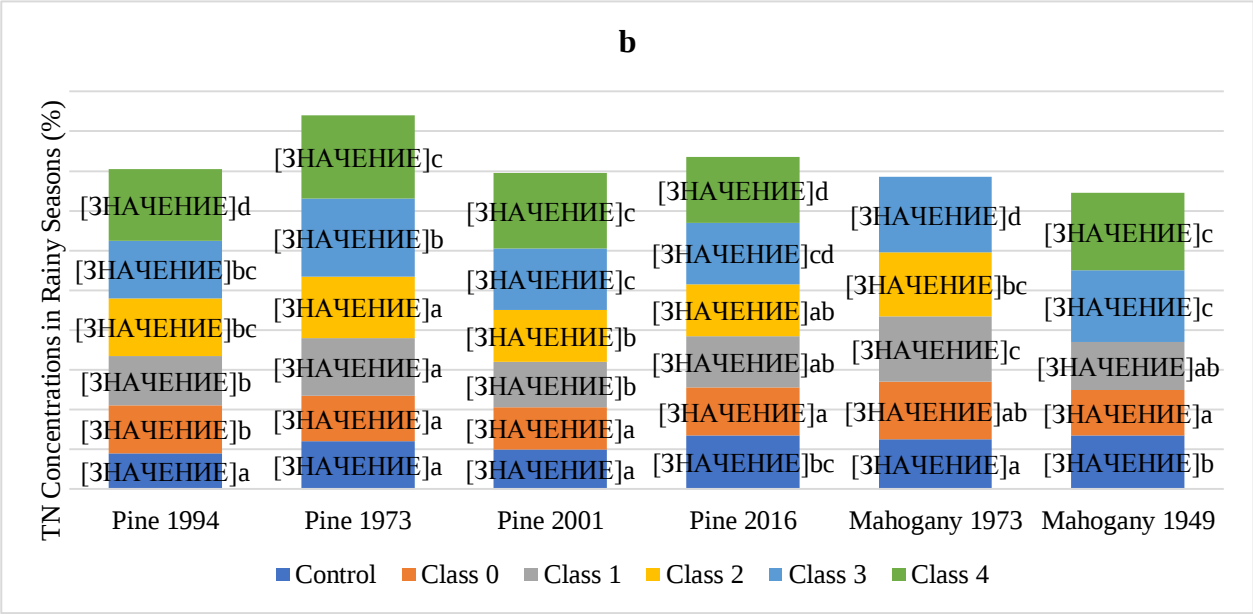
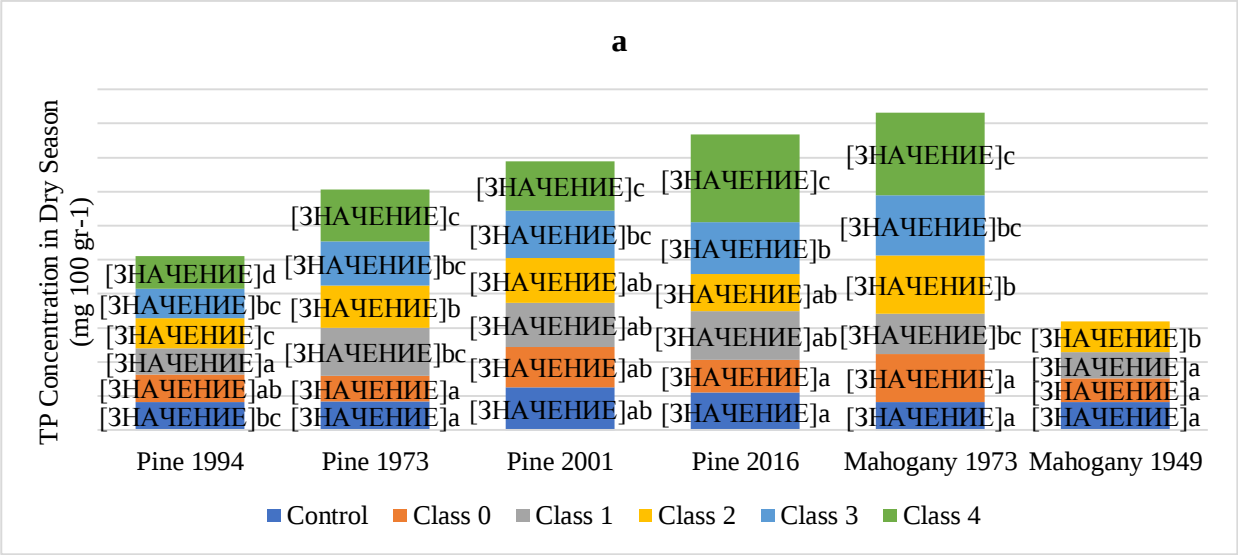


Fig. 5. TN content based on termite activity levels across different stands during (a) dry and (b) rainy seasons.
Note. Means followed by the same letter are not significantly different according to DMRT at $P < 0.05$;
(a) TN concentration in dry season; (b) TN concentration in rainy season.



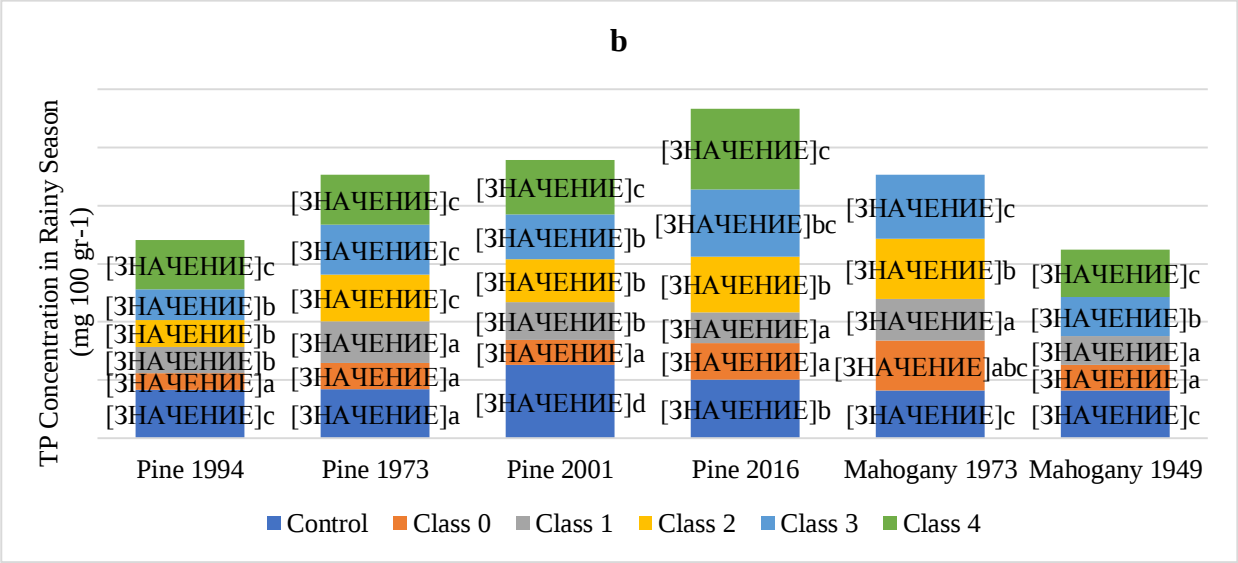
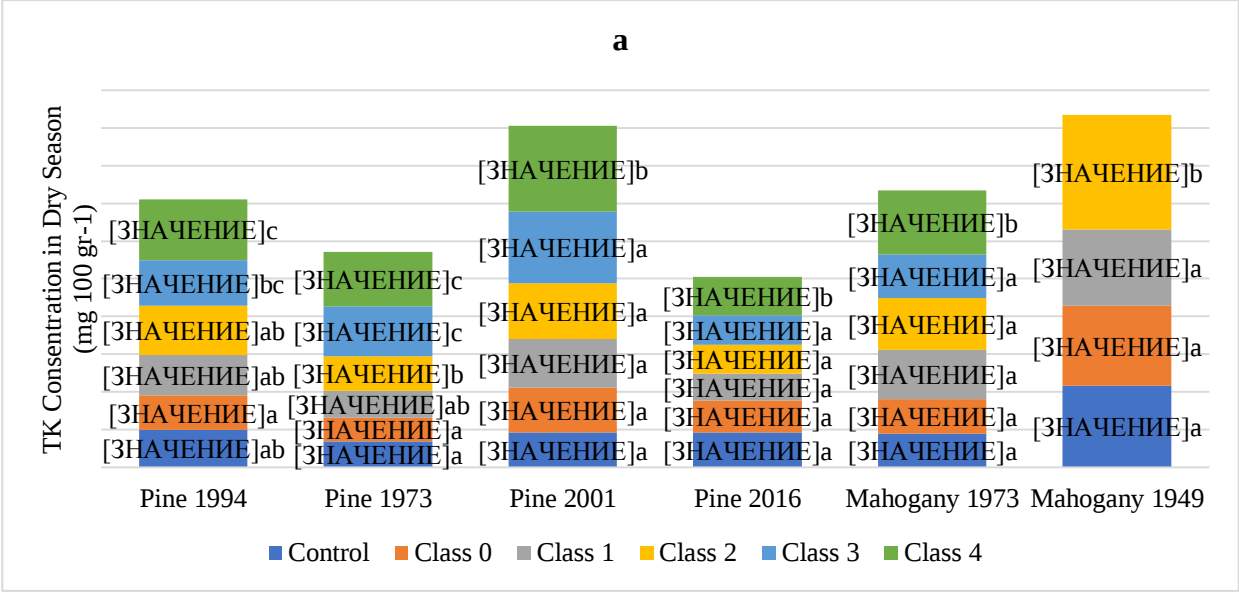


Fig. 6. TP content based on termite activity level across different stands during (a) dry and (b) rainy seasons.
Note. Means followed by the same letter are not significantly different according to DMRT at $P < 0.05$;
(a) TP concentration in dry season; (b) TP concentration in rainy season.

The highest of TK content for both seasons was recorded in stake damage class 4, namely in Pine 1994 (32.32 mg 100 g⁻¹ and 32.57 mg 100 g⁻¹), Pine 1973 (28.88 mg 100 g⁻¹ and 22.90 mg 100 g⁻¹), Pine 2001 (45.58 mg 100 g⁻¹ and 27.96 mg 100 g⁻¹), and Pine 2016 (20.49 mg 100 g⁻¹ and 28.28 mg 100 g⁻¹). In Mahogany 1973, the highest value during the dry season was also found in stake damage class 4 (34.25 mg 100 g⁻¹), while during the rainy season, it was recorded in stake damage class 3 (23.28 mg 100 g⁻¹). In Mahogany 1949, the highest value during the dry season was observed in stake damage class 2 (60.87 mg 100 g⁻¹) and in stake damage class 4 during the rainy season (45.39 mg 100 g⁻¹). As with other nutrients, the lowest TK values were generally found in stake damage class 0 and control soils, although some stands exhibited fluctuating values (Fig. 7).

SMBC content based on termite activity levels in different stand types at Alas Bromo. Soil microbial biomass carbon (SMBC) increased during the dry season and decreased during the rainy season. This is attributed to the high termite diversity index in the dry season and its low value during the rainy season (Fig. 8).

The highest SMBC content was generally found at stake damage class 4, indicating the highest termite activity. The highest SMBC content during the rainy season in Pine 1994, Pine 2001, Pine 2016, and Pine 1973 occurred at stake damage class 4, with values of 2.59 μ g⁻¹, 1.53 μ g⁻¹, 2.34 μ g⁻¹, and 2.14 μ g⁻¹, respectively. Meanwhile, during the dry season, the SMBC values in Mahogany 1973, Pine 1994, Pine 2001, Pine 2016, and Pine 1973 were also highest at stake damage class 4, with values of 3.00 μ g⁻¹, 2.74 μ g⁻¹, 2.73 μ g⁻¹, 2.37 μ g⁻¹, and 2.28 μ g⁻¹, respectively. In contrast, Mahogany 1949 exhibited the highest value during the rainy season at the control soil with a value of 2.55 μ g⁻¹, and during the dry season, the highest value was recorded at stake damage class 2 (3.60 μ g⁻¹), while during the rainy season, it was again at the control soil. Similar to Mahogany 1949, Mahogany 1973 also showed the highest value during the rainy season at stake damage class 3 with a value of 2.53 μ g⁻¹ (Fig. 8).



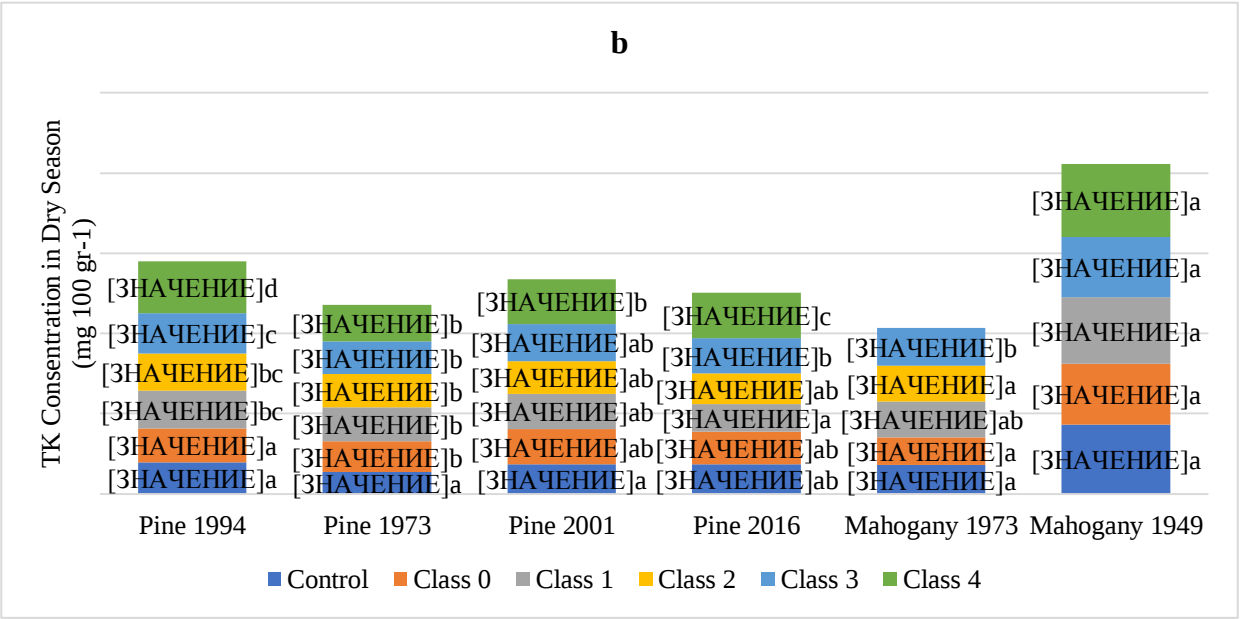
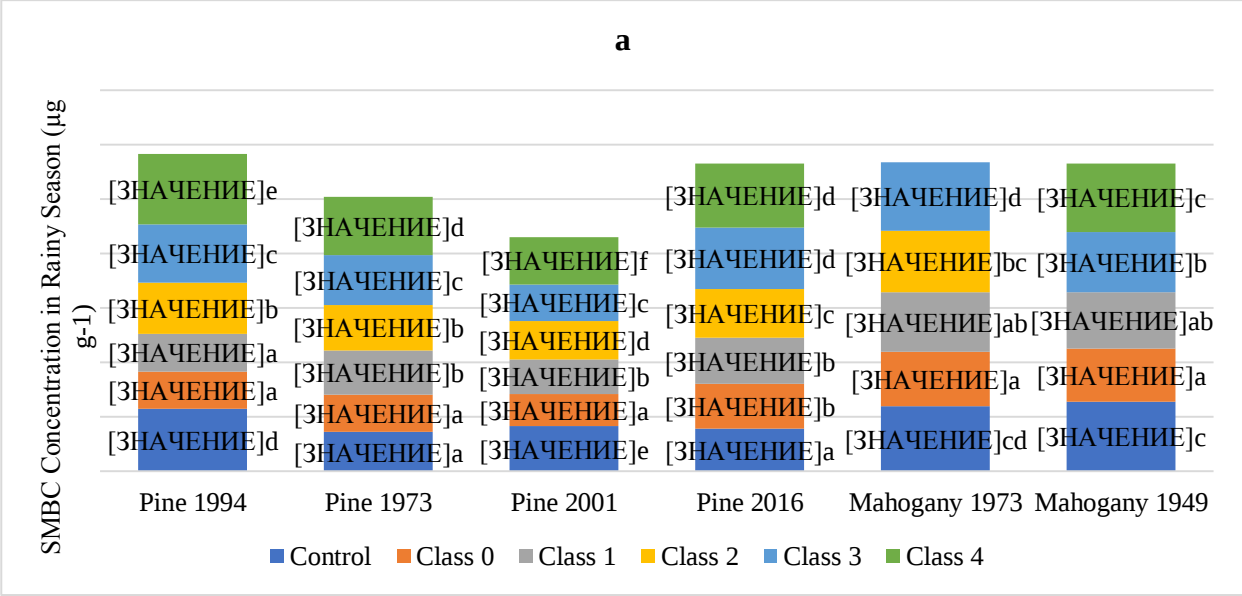


Fig. 7. TK content based on termite activity level across different stands during (a) dry and (b) rainy seasons.
Note. Means followed by the same letter are not significantly different according to DMRT at $P < 0.05$;
(a) TK concentration in dry season; (b) TK concentration in rainy season.



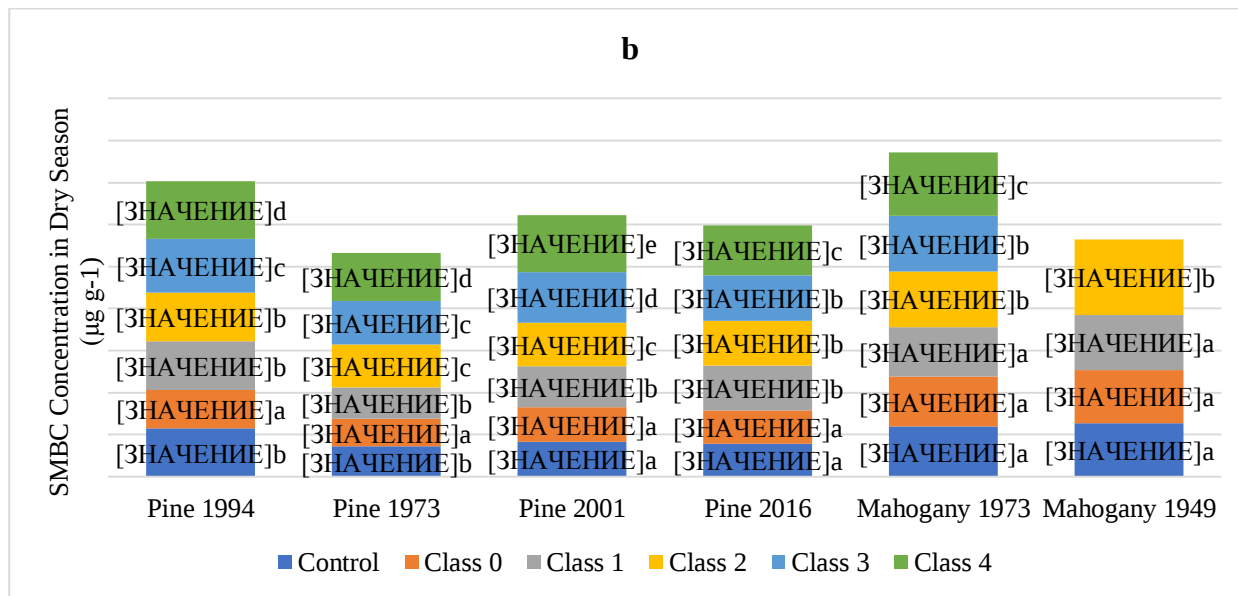


Fig. 8. SMBC content based on termite activity level across different stands during (a) dry and (b) rainy seasons.
Note. Means followed by the same letter are not significantly different according to DMRT at $P < 0.05$;
(a) SMBC concentration in dry season; (b) SMBC concentration in rainy season.

Correlation between termite activity, soc, and soil nutrient content. The correlation between parameters were analyzed using correlation tests, where a Pearson correlation coefficient close to 1 indicates a strong association between the variables. A positive (+) value denotes a direct (positive) correlation, while a negative (–) value indicates an inverse (negative) correlation (Akoglu, 2018) (Table 2).

Table 2. The correlation between termite activity, SOC, and nutrient content

No	Indicator	Termite activity level	SOC	TN	TP	TK
1	SOC	0.316**				
2	TN	0.771**	0.365**			
3	TP	0.431**	0.198**	0.437**		
4	TK	0.256**	0.513**	0.311**	-0.01	
5	SMBC	0.487**	0.840**	0.525**	0.448**	0.558**

Note. ** Highly Significant; Soil Organic Carbon (SOC), Total Nitrogen (TN), Total Phosphorus (TP), Total Potassium (TK), Soil Microbial Biomass Carbon (SMBC).

Role of termites in soil enhancement. The variation in the observed diversity index values may be influenced by several factors, one of which is the difference in the types of stake baits used. Each wood species exhibits varying levels of resistance to termite attack (Kalleshwaraswamy et al., 2022). Pine is a soft wood species preferred by termites (Waller et al., 1990), because it is highly palatable, it is commonly used as termite bait (Arinana et al., 2022). Mahogany is a hard wood with high resistance to termite attack, making it less attractive to termites (Morales-Ramos, Guadalupe Rojas, 2001).

Additionally, another factor that influences termite diversity is the season, with a tendency for a decrease in termite diversity index during the rainy season. As shown by Bissett et al. (2019), study in the semi-arid grasslands of Zimbabwe, where termite populations were found to increase during the dry season. Foraging behavior also plays a role, as the genus *Odontotermes* sp. is more frequently observed during

the dry season compared to the rainy season (Wale, Nega, 2019). This factor is further supported by the presence of soil within tunnels constructed by termites during the dry season.

Organic compound enrichment by simbiotic microbe in termite. Stake damage classes used to reflect termite activity levels can demonstrate a tendency for higher termite activity to be associated with increased SOC content (Fig. 4). Termites are ecosystem engineers that modulate carbon flow from organic matter, such as dead wood, into the soil (Myer et al., 2021). A study conducted in the highlands of southwestern Ethiopia confirmed that termite activity can enhance soil chemical properties, particularly soil organic carbon and nutrient content (Jembere et al., 2017). Its contribution to the carbon cycle through the decomposition of dead organic matter (Issoufou et al., 2019); Jones, 1990), bioturbation, and lignocellulose digestion (Bignell et al., 2011). The wood they consume primarily consists of carbon in the form of cellulose and lignin, and within their digestive system, they form symbiotic relationships with bacteria and protozoa that assist in digesting the wood as well as extracting nutrients such as N, P, and other non-carbon elements. As a result, what remains in termite feces is carbon-rich material, a phenomenon referred to as stoichiometric shift. This means that termites and their symbionts alter the composition of organic matter, such as the wood they consume, by absorbing essential elements like carbon, thereby increasing soil carbon content through the feces they excrete (Filipiak, Weiner, 2017).

Similar to SOC, high termite activity has a significant influence on nitrogen (Fig. 5), contributing substantially to nitrogen fluxes within tropical ecosystems (Ji, Brune, 2006; Ji, Brune, 2006). Termites function as bioindicators of soil fertility, playing a crucial role in nitrogen fixation (Nithyatharani, Kavitha, 2018). According to Ji & Brune (2006), within the termite digestive system, highly alkaline conditions (up to pH 12) in the bacteria-rich hindgut facilitate the breakdown of peptides and proteins from nitrogen-containing food into ammonia (NH_3) and ammonium (NH_4^+). This process is further supported by proteolytic enzymes that remain active under alkaline conditions. NH_3 accumulation and release occur when its concentration in the termite hindgut reaches a high threshold, at which point it is excreted both

through feces and directly from the body. The NH_4^+ released via feces is absorbed into the soil, thereby enhancing soil fertility. Additionally, nitrogen is stored within termite nests, protecting it from leaching. Termites play a vital role in influencing soil nitrogen levels through their feeding and nesting activities, which contribute to increased nitrogen mineralization and ammonia accumulation (Ngugi et al., 2011) and its role in nitrogen fixation, which subsequently affects nitrogen dynamics and the ecosystem functioning of its habitat (Benemann, 1973; Fox-Dobbs et al., 2010).

The high level of bait stake damage, accompanied by increased TP content (Fig. 6), indicates that phosphorus distribution in the soil can be significantly influenced by termite activity (Rajeev, Sanjeev, 2012). Through their biogenic structure, termites influence the phosphorus cycle in the soil and affect nutrient dynamics (Chapuis-Lardy et al., 2011) as demonstrated by a study in the savanna, which showed that termites impact soil phosphorus status, particularly in their mound structures (López-Hernández et al., 2006). The high termite activity, as reflected by the stake damage class, influences the TK content (Fig. 7). According to Lejolya et al. (2019), soil inhabited by termites experience an increase in nutrients such as potassium. Another study in the southwest Ethiopian highlands stated that soil nutrients, including potassium, increased due to high termite activity (Jembere et al., 2017). Through their construction activities, termites can influence soil properties, such as causing potassium export, which subsequently increases soil potassium in areas affected by their activity (Harit et al., 2017).

The increase in SMBC may be attributed to the activity of microorganisms present within the termite's body (Fig. 8). The termite body (gut) hosts various microorganisms that engage in mutualistic symbiosis with the termites, such as bacteria, archaea, fungi, and protozoa. These microbes are involved in cellulose degradation and contribute to the development of the termite host by producing cellulose within its body (Yu et al., 2025). Bacteria present in the termite gut can assist in degrading lignocellulosic substrates (Azizi-Shotorkhoft et al., 2016). Protist communities symbiotically associated with lower termites are capable of producing more complex cellulolytic enzymes than those produced by the termites themselves (Ni, Tokuda, 2013). This results in termite activity being closely associated with the symbi-

otic microorganisms present within their bodies. The level of SMBC in the soil depends on both the microbial population and the carbon content of the soil. Other studies have confirmed that limited carbon availability can reduce overall soil microbial C and inhibit respiration rates, as microbes have less organic substrate to metabolize. Microbial respiration refers to the release of carbon dioxide (CO_2) during the decomposition of soil organic matter by microorganisms, and it is positively correlated with soil microbial biomass content (Elrys et al., 2025).

The level of termite activity was positively correlated with SOC ($r = 0.316$), TN ($r = 0.771^{**}$), TP ($r = 0.431^{**}$), TK ($r = 0.256^{**}$), and SMBC ($r = 0.487^{**}$) (Table 2). These positive correlations indicate that higher termite activity is associated with increased levels of SOC, N, P, K, and microbial carbon in the soil. Ecologically, termites act as 'ecosystem engineers' as they influence soil processes and properties, including nutrient availability and the decomposition of organic matter (Ahmad, Dawah, 2018). There is a correlation between termite activity and SOC, as termites enhance SOC through the decomposition of organic materials such as litter, which are subsequently reincorporated into the soil (Donovan et al., 2001). Termites play an important role in enhancing and recycling nutrients (N, P, K). Termite activity can influence soil fertility and ecosystem dynamics due to the increased concentration of nutrients (Donovan et al., 2001; Kaschuk et al., 2006; Lejolya et al., 2019). Termites play an important role in increasing the microbial carbon content of the soil due to the presence of symbiotic microorganisms within their bodies. The termite gut contains symbiotic microorganisms such as bacteria, archaea, fungi, and protists (Yu et al., 2025), which play a crucial role in the breakdown of lignocellulose from grasses and wood (Tapiwa et al., 2025).

There is a positive correlation between SOC and Soil TN ($r = 0.365^{**}$), according to (Hayadi et al., 2014; Shaheen, Matien, 2016). Due to the positive interaction, the SOC content has a significant influence on TN levels. A positive correlation is also observed between SOC and TP in the soil ($r = 0.198^{**}$), according to Soemarno et al. (2021); Vermeiren et al. (2022), the increase in SOC can contribute to the rise in TP levels in the soil. A positive correlation exists between SOC and TK in the soil (Han et al., 2006; Pan et al., 2019). There is a positive correlation between SOC and SMBC ($r = 0.840^{**}$). According

to (Das et al., 2023), SMBC has a positive correlation with SOC and microbial respiration. C-microbial is the most active fraction of soil organic matter, thus playing a crucial role in regulating the loss and sequestration of organic carbon (Cai et al., 2025).

CONCLUSION

The results of this study show that the termite diversity index varies across different stand types. This difference is influenced by the type of wood bait used, which affects termite presence, with termites being more easily found on pine wood compared to mahogany. Termites, as soil ecosystem engineers, are linked to SOC and nutrient content. The level of termite activity, observed through the degree of damage to wooden stakes used as bait, can contribute to the improvement of soil quality. Higher termite activity leads to an increase in soil organic carbon content, nutrients (NPK), and SMBC levels.

REFERENCES

1. Ahmad S.K., Dawah H., Termites and Sustainable Management, In: *Termites and Sustainable Management*, 2018, Iss. March, Jazan University, DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-72110-1>.
2. Arinana A., Rahman M.M., Silaban R.E.G., Himmi S.K., Nandika D., Preference of Subterranean Termites among Community Timber Species in Bogor, Indonesia, *Journal of the Korean Wood Science and Technology*, 2022, Vol. 50(6), pp. 458–474, DOI: <https://doi.org/10.5658/WOOD.2022.50.6.458>.
3. Ariyanto, D.P., Wijayanti, A.R., Suyana, J., Kesesuaian Lahan Tanaman Jahe, Kencur, Kunyit, dan Serai Wangi sebagai Komoditas Agroforestri di KHDTK Gunung Bromo, Kabupaten Karanganyar, *Jurnal Penelitian Hutan Tanaman*, 2022, Vol. 19(2), pp. 75–89, DOI: <https://doi.org/10.59465/jph.t.v19i2.785>.
4. Augustoa L., Ranger J., Binkley D., Rothe A., Soil detritivore macro-invertebrate assemblages throughout a managed beech rotation, *Annals of Forest Science*, 2007, 64, pp. 219–228, DOI: <https://doi.org/10.1051/forest>.
5. Azizi-Shotorkhoft A., Mohammadabadi T., Motamedi H., Chaji M., Fazaeli H., Isolation and identification of termite gut symbiotic bacteria with lignocellulose-degrading potential, and their effects on the nutritive value for ruminants of some by-products, *Animal Feed Science and Technology*, 2016, 221, pp. 234–242, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2016.04.016>.
6. Benemann J.R., Nitrogen Fixation in Termites, *Science*, 1973, Vol. 181,

pp. 164–165.

7. Bignell D.E., Roisin Y., Lo N., Biology of termites: A Modern synthesis, In: *Biology of Termites: A Modern Synthesis*, 2011, DOI: <https://doi.org/10.1007/978-90-481-3977-4>.
8. Bissett J.L., Macdonald I.A.W., Mitchell J.D., Seasonal Abundance of the Harvester Termite, *Hodotermes mossambicus* (Hagen) (Isoptera: Hodotermitidae), and Its Impact on Vegetation in a Semi-Arid Grassland in Zimbabwe, *African Entomology*, 2019, Vol. 27(1), pp. 201–217, DOI: <https://doi.org/10.4001/003.027.0201>.
9. Cai Y., Yang Y., Jiang J., Long T., Gu X., Guo Y., Li M., Xie Y., Response of soil organic carbon stocks and soil microbial biomass carbon to natural grassland conversion: A global meta-analysis, *Science of the Total Environment*, 2025, Vol. 965, 178481, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.178481>.
10. Chapuis-Lardy L., Le Bayon R.-C., Brossard M., López-Hernández D., Blanchart E., Role of Soil Macrofauna in Phosphorus Cycling, In: E. Bünemann, A. Oberson, & E. Frossard (Eds.), *Phosphorus in Action: Biological Processes in Soil Phosphorus Cycling*, 2011, pp. 199–213, DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-15271-9_8.
11. Das S., Deb S., Sahoo S.S., Sahoo U.K., Soil microbial biomass carbon stock and its relation with climatic and other environmental factors in forest ecosystems: A review, *Acta Ecologica Sinica*, 2023, Vol. 43(6), pp. 933–945, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2022.12.007>.
12. de Jonge I.K., Cornelissen J.H.C., Olff H., Berg M.P., van Logtestijn R.S.P., Veldhuis M.P., Secondary compounds increase litter removal by termites across 23 savanna grass species, *Journal of Ecology*, 2024, Vol. 112(9), pp. 2031–2042, DOI: <https://doi.org/10.1111/1365-2745.14376>.
13. Donovan S.E., Eggleton P., Dubbin W.E., Batchelder M., Dibog L., *The effect of a soil-feeding termite, Cubitermes fungifaber (Isoptera: Termitidae) on soil properties: termites may be an important source of soil microhabitat heterogeneity in tropical forests*, 2001, Vol. 11, pp. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.1078/0031-4056-00063>.
14. Eggleton P., Global Patterns of Termite Diversity, In: T. Abe, D.E. Bignell, M. Higashi (Eds.), *Termites: Evolution, Sociality, Symbioses, Ecology*, 2000, pp. 25–51, DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-017-3223-9_2.
15. Elrys A.S., Wen Y.H., Feng D., El-Mekkawy R.M., Kong M., Qin X., Lu Q., Dan X., Zhu Q., Tang S., Wu Y., Meng L., Zhang J., Cadmium inhibits carbon and nitrogen cycling through soil microbial biomass and reduces soil nitrogen availability, *Journal of Hazardous Materials*, 2025, Vol. 489, 137524, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2025.137524>.

16. Filipiak M., Weiner J., Nutritional dynamics during the development of xylophagous beetles related to changes in the stoichiometry of 11 elements, *Physiological Entomology*, 2017, Vol. 42(1), pp. 73–84, DOI: <https://doi.org/10.1111/phen.12168>.
17. Fox-Dobbs K., Doak D.F., Brody A.K., Palmer T.M., Termites create spatial structure and govern ecosystem function by affecting N₂ fixation in an East African savanna, *Ecology*, 2010, Vol. 91(5), pp. 1296–1307.
18. Griffiths H.M., Ashton L.A., Evans T.A., Parr C.L., Eggleton P., Termites can decompose more than half of deadwood in tropical rainforest, *Current Biology*, 2019, Vol. 29(4), R118–R119, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cub.2019.01.012>.
19. Harit A., Moger H., Duprey J.L., Gajalakshmi S., Abbasi S.A., Subramanian S., Jouquet P., Termites can have greater influence on soil properties through the construction of soil sheetings than the production of above-ground mounds, *Insectes Sociaux*, 2017, Vol. 64(2), pp. 247–253, DOI: <https://doi.org/10.1007/s00040-017-0541-3>.
20. Issoufou et al., Effects of termites growth on litter decomposition: a modeling approach, *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 2019, Vol. 8, pp. 415–421, DOI: <https://doi.org/10.1007/s40093-019-00314-7>.
21. Jembere A., Berecha G., Tolossa A.R., Impacts of termites on selected soil physicochemical characteristics in the highlands of Southwest Ethiopia, *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2017, Vol. 63(12), pp. 1676–1684, DOI: <https://doi.org/10.1080/03650340.2017.1307506>.
22. Ji R., Brune A., Nitrogen mineralization, ammonia accumulation, and emission of gaseous NH₃ by soil-feeding termites, *Biogeochemistry*, 2006, Vol. 78(3), pp. 267–283, DOI: <https://doi.org/10.1007/s10533-005-4279-z>.
23. Jones, Termites, Soil Fertility and Carbon Cycling in Dry Tropical Africa: A Hypothesis, *Journal of Tropical Ecology*, 1990, Vol. 6(3), pp. 291–305, DOI: <https://doi.org/10.1017/S0266467400004533>.
24. Joshi R., Singh H., Chhetri R., Poudel S.R., Rijal S., Carbon sequestration potential of community forests: A comparative analysis of soil organic carbon stock in community managed forests of far-western Nepal, *Eurasian Journal of Soil Science*, 2021, Vol. 10(2), pp. 96–104, DOI: <https://doi.org/10.18393/ejss.825066>.
25. Jouquet P., Dauber J., Lagerlöf J., Lavelle P., Lepage M., Soil invertebrates as ecosystem engineers: Intended and accidental effects on soil and feedback loops, *Applied Soil Ecology*, 2006, Vol. 32(2), pp. 153–164, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2005.07.004>.
26. Kalleshwaraswamy Sundararaj R., Shanbhag R.R., Science of Wood Degradation and its Protection, *Science of Wood Degradation and Its*

- Protection*, 2022, pp. 1–744, DOI: <https://doi.org/10.1007/978-981-16-8797-6>.
27. Kanyi N.C., Karuri H., Nyasani J.O., Mwangi B., Land use effects on termite assemblages in Kenya, *Heliyon*, 2021, Vol. 7(12), pp. 1–11, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08588>.
28. Kaschuk G., Santos J.C.P., Almeida J.A., Deise C.S., Francisco B.-J.J., Termite Activity in Relation to Natural Grassland Soil Attributes, *Sci. Agric.*, 2006, Vol. 63(6), pp. 583–588, DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-9016200600060001>.
29. Khan M.A., Ahmad W., Paul B., Ecological Impacts of Termites, In: *Termites and Sustainable Management*, 2018, pp. 201–216, DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-72110-1_10.
30. Lejolya J., Cornelisa J.-T., Ranst E., Van Jansegersd E., Tarpind C., Degré A., Colineta G., Malaissee F., Effects of termite sheetings on soil properties under two contrasting soil management practices, *Pedobiologia*, 2019, Vol. 76, pp. 1–8, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2019.150573>.
31. López-Hernández D., Brossard M., Fardeau J.C., Lepage M., Effect of different termite feeding groups on P sorption and P availability in African and South American savannas, *Biology and Fertility of Soils*, 2006, Vol. 42(3), pp. 207–214, DOI: <https://doi.org/10.1007/s00374-005-0017-x>.
32. Maynard D.S., Crowther T.W., King J.R., Warren R.J., Bradford M.A., Temperate forest termites: Ecology, biogeography, and ecosystem impacts, *Ecological Entomology*, 2015, Vol. 40(3), pp. 199–210, DOI: <https://doi.org/10.1111/een.12185>.
33. Morales-Ramos J.A., Guadalupe Rojas M., Nutritional ecology of the formosan subterranean termite (Isoptera: Rhinotermitidae): Feeding response to commercial wood species, *Journal of Economic Entomology*, 2001, Vol. 94(2), pp. 516–523, DOI: <https://doi.org/10.1603/0022-0493-94.2.516>.
34. Mugerwa S., Nyangito M., Nderitu Mpairwe D., John, Effect of biotic and abiotic factors on composition and foraging intensity of subterranean termites, *African Journal of Environmental Science and Technology*, 2011, Vol. 5(8), pp. 579–585.
35. Myer A., Forschler B.T., Evidence for the Role of Subterranean Termites (*Reticulitermes* spp.) in Temperate Forest Soil Nutrient Cycling, *Ecosystems*, 2019, Vol. 22(3), pp. 602–618, DOI: <https://doi.org/10.1007/s10021-018-0291-8>.
36. Myer A., Myer M.H., Trettin C.C., Forschler B.T., The fate of carbon utilized by the subterranean termite *Reticulitermes flavipes*, *Ecosphere*, 2021, Vol. 12(12), DOI: <https://doi.org/10.1002/ecs2.3872>.
37. Ngugi D.K., Ji R., Brune A., Nitrogen mineralization, denitrification, and nitrate ammonification by soil-feeding termites: a ¹⁵N-based approach, *Biogeochemistry*, 2011, Vol. 103, pp. 355–369.

38. Ni J., Tokuda G., Lignocellulose-degrading enzymes from termites and their symbiotic microbiota, *Biotechnology Advances*, 2013, Vol. 31(6), pp. 838–850, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2013.04.005>.
39. Nithyatharani R., Kavitha U., Termite Soil as Bio-Indicator of Soil Fertility, *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 2018, Vol. 6(1), pp. 659–661, DOI: <https://doi.org/10.22214/ijraset.2018.1099>.
40. Nyirenda H., Asse'de' E.P.S., ... Geldenhuys C., Nsubuga F.W., The effect of land use change and management on the vegetation characteristics and termite distribution in Malawian Miombo woodland agroecosystem, *Agroforestry Systems*, 2019, Vol. 93(6), pp. 2331–2343, DOI: <https://doi.org/10.1007/s10457-019-00358-8>.
41. Rachmadiyah A.N., Helmanto H., Himmi S.K., Tarmadi D., Wikantoso B., Yusuf S., Kurniawati F., Mahmudin, Sunandar D., Suherman D., Haryanto A.P., Non-destructive detection of tree deterioration due to termite attack in plant conservation areas, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2023, Vol. 1266(1), DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1266/1/012071>.
42. Rajeev V., Sanjeev A., *Impact of Termite Activity and Its Effect on Soil Composition*, 2011, Vol. 2(2), pp. 399–404, URL: [https://www.academia.edu/49301866/Impact of termite activity and its effect on soil composition#abstract](https://www.academia.edu/49301866/Impact_of_termite_activity_and_its_effect_on_soil_composition#abstract).
43. Risky D., Sebayang K., Susanti R., Muhammadiyah U., Utara S., Timur K.M., Preferences of Subterranean Termites (*Coptotermes* sp.) for Monocotyledonous Plants and Dicotyledonous Plants on Mineral, 2024, Vol. 6(3), DOI: <https://doi.org/10.36378/juatika.v6i3.3663>.
44. Soetignya W.P., Marniati P., Adijaya M., Anzani Y.M., The diversity of plankton as bioindicators in Kakap River Estuary, West Kalimantan, *Depik*, 2021, Vol. 10(2), pp. 174–179, DOI: <https://doi.org/10.13170/depik.10.2.21303>.
45. Spellerberg I.A.N.F., Fedor P.J., Tribute to Claude Shannon (1916–2001), *Global Ecology and Biogeography*, 2003, Vol. 12, pp. 177–179, DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.1046/j.1466-822X.2003.00015.x>.
46. Tapiwa E., Amobonye A., Bhagwat P., Kumar N., Carvalho J.C.De, Permaul K., Pillai S., Biomass and Bioenergy Exploring the termite gut as a hub of industrially important microbes and enzymes for biofuel production, *Biomass and Bioenergy*, 2025, No. 199, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2025.107899>.
47. Vasconcellos A., Biomassa e abundância de térmitas em três remanescentes de Mata Atlântica do Nordeste brasileiro, *Revista Brasileira de Entomologia*, 2010, Vol. 54(3), pp. 455–461, DOI:

<https://doi.org/10.1590/S0085-56262010000300017>.

48. Wale M., Nega D., Seasonal Distribution and Diversity of Termite Taxa in Different Habitats in the Middle Montane Ecozone of Northwestern Ethiopia, *Research Square*, 2019, pp. 1–9, DOI:

<https://doi.org/https://doi.org/10.21203/rs.2.10018/v1>.

49. Waller D.A., Jones C.G., La Fage J.P., Measuring wood preference in termites, *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 1990, Vol. 56(2), pp. 117–123, DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1570-7458.1990.tb01388.x>.

50. Yu W., Wu Y., Li D., International Journal of Biological Macromolecules Oxidative cleavage of cellulose by fungi in the termite gut, *International Journal of Biological Macromolecules*, 2025, Vol. 284(P2), 138222, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.138222>.

УДК 631.481:536.7:550.4.01 (470)

DOI: 10.19047/0136-1694-2026-128-118-146



Ссылки для цитирования:

Ергина Е.И., Новицкий М.Л. Свойства почв постирригационных агроландшафтов Присивашья // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2026. Вып. 128. С. 118-146. DOI: 10.19047/0136-1694-2026-128-118-146

Cite this article as:

Ergina E.I., Novitsky M.L., Properties of soils of post-irrigation agrolandscapes of Sivash Lowland, Dokuchaev Soil Bulletin, 2026, V. 128, pp. 118-146, DOI: 10.19047/0136-1694-2026-128-118-146

Благодарность:

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 24-17-20020 <https://rscf.ru/project/24-17-20020/> и Министерства образования, науки и молодежи Республики Крым.

Acknowledgments:

The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 24-17-20020 <https://rscf.ru/project/24-17-20020/> and the Ministry of Education, Science and Youth of the Republic of Crimea.

Свойства почв постирригационных агроландшафтов Присивашья

© 2026 г. Е. И. Ергина¹, М. Л. Новицкий^{1,2}

¹Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, Россия,
295007, Симферополь,
e-mail: ergina65@mail.ru.

²Никитский ботанический сад, Национальный научный центр, Россия,
298648, Ялта,
<https://orcid.org/0000-0002-6860-3049>, e-mail: maxim.novickiy@bk.ru.

Поступила в редакцию 28.03.2025, после доработки 02.02.2026,
принята к публикации 29.04.2026

Резюме: В статье рассмотрена трансформация физических, физико-химических и химических свойств лугово-каштановых почв на ключевом участке с различными вариантами землепользования: залежь – богарный – постирригационный (полевой севооборот, рисовый чек). На всех исследуемых вариантах почва по гранулометрическому составу тяжелая

и представлена легкой глиной и тяжелым суглинком с преобладанием илистых и крупнопылеватых фракций. В сравнении с залежной почвой на постирригационных участках наблюдается увеличение доли дефляционно опасной пыли средней и мелкой, уменьшение доли песчаных фракций и содержания физической глины в пахотном горизонте. Все варианты исследованных лугово-каштановых солонцеватых почв отличаются высокой плотностью сложения и низкой пористостью. Обработка почвы сельскохозяйственной техникой способствует ухудшению ее физических свойств в подпахотном горизонте. За время полувекового функционирования агроландшафтов в условиях орошения произошли значительные трансформации химического состава почв, наблюдающиеся и в настоящее время. Почвы залежного участка относятся к глубокосолончаковым, а почвы постирригационного участка под полевыми севооборотами трансформировались в незасоленные варианты и сохраняют эту тенденцию на протяжении 34 лет. На участках под бывшим рисовым чеком аналогичная ситуация – почва выщелочена от солей на всю глубину профиля, процессов вторичного засоления не наблюдается.

Ключевые слова: почвы; орошение; постирригационные агроландшафты; засоленность; токсичные соли; водная вытяжка.

Properties of soils of post-irrigation agrolandscapes of Sivash Lowland

© 2026 E. I. Ergina¹, M. L. Novitsky^{1,2}

¹V.I. Vernadsky Crimean Federal University,
295007, Simferopol, Russian Federation,
e-mail: ergina65@mail.ru.

²Nikitsky Botanical Garden, National Scientific Center,
298648, Yalta, Russian Federation,
<https://orcid.org/0000-0002-6860-3049>, e-mail: maxim.novickiy@bk.ru.

Received 28.03.2025, Revised 02.02.2026, Accepted 29.04.2026

Abstract: The article considers the transformation of physical, physico-chemical and chemical properties of meadow-chestnut soils in a key area with various land use options: virgin – bogara – irrigation (field crop rotation, rice paddy). In all the studied variants, the soil is heavy in terms of granulometric composition and is represented by light clay and heavy loam with a predominance of silty and coarse-powdered fractions. In comparison with virgin soil in irrigation areas, there is an increase in deflation-hazardous dust

of medium and fine dust, a decrease in the proportion of sand fractions, and a decrease in the content of physical clay in the arable horizon. All variants of the studied meadow-chestnut saline soils are characterized by high density of composition and low porosity. Tillage with agricultural machinery contributes to the deterioration of the physical properties of the soil in the sub-arable horizon. During the half-century of functioning of agrolandscapes under irrigation conditions, significant transformations of the chemical composition of soils have occurred, which are still observed today. The soils of the virgin area are deeply saline, and the soils of the post-irrigation area under field crop rotations have transformed into non-saline variants and have maintained this trend for 34 years. The situation is similar in the areas under the former rice paddy – the soil is leached of salts from the depth of the entire profile and secondary salinization processes are not observed.

Keywords: soils; irrigation; post-irrigation agrolandscapes; salinity; toxic salts; water extraction.

ВВЕДЕНИЕ

Современными исследованиями достоверно установлено, что сельскохозяйственная деятельность приводит к изменению свойств и направлений протекания почвенных процессов, которые не являются типичными для почв, сформированных в автономных условиях ландшафта; кроме того, резко меняется биологический круговорот химических (питательных) элементов. Распашка, обработка почвы в ходе выращивания сельскохозяйственных растений обуславливает механическое перемешивание почвенной массы (плантажной вспашкой до 60–65 см) верхних горизонтов и вызывает нарушение природного сложения профиля почв. Замена естественной растительности культурной, орошение, осушение и т. д. приводят к постепенной трансформации почвенной массы, изменению природных процессов и режимов. Происходит структурная реорганизация почв: водно-физических, химических, физико-химических, биологических показателей. В результате такого специфического процесса почвообразования формируется новый профиль почв (Тихоненко, 2011). Фактически происходит замещение естественного почвообразовательного процесса на антропогенный и/или культурный. Изучение характеристик почв, динамики их свойств в результате сельскохозяйственного влияния занимает отдельную отрасль в почвоведении (Муха, 2004). Значи-

тельная антропогенная нагрузка привела к масштабным процессам деградации почвенного покрова. Усиливаются процессы эрозии, дегумификации, вторичного засоления почв. В масштабах Крымского полуострова длительное орошение территории большей части Равнинного Крыма (с 60-х годов прошлого века) днепровской водой, поступающей по Северо-Крымскому каналу, а это свыше 397.3 тыс. га (согласно данным ГБУ РК “Крымская гидрогеолого-мелиоративная экспедиция”), привело к развитию несвойственных для автономных ландшафтов направлений функционирования геосистем. Это вызвало перестройку внутрипочвенных зонально обусловленных процессов. Развитие рисоводства с интенсивным водопотреблением и дальнейший сброс избытка поливных вод из дренажных коллекторов в заливы Черного и Азовского морей привели к понижению верхней границы карбонатного горизонта, уменьшению доли обменного натрия и магния, нейтрализации щелочности почв, уплотнению срединных горизонтов и нарушению геохимического баланса прилегающих территорий. На пониженных участках с повышенным уровнем грунтовых вод (УГВ) наблюдалось вторичное засоление почв, а также увеличение в составе ППК натрия, появлялась высокая щелочность (ГОСТ 26483-85). После 2014 г. подача днепровской воды по Северо-Крымскому каналу была прекращена (за исключением короткого периода с весны 2022 г. по лето 2023 г.). На ранее орошавшихся территориях начали формироваться постирригационные агроландшафты с иной системой землепользования (Хитров и др., 2016). Исследования эволюции почв под воздействием орошения проводились ранее рядом наших ведущих ученых-почвоведов (Новикова и др., 2009; Любимова, Мотузов, 2005; Любимова, 2006; Мотузов и др., 2004; Любимова и др., 2011; Турусов и др., 2015; Кольцов, Титков, 2019). Для Крымского полуострова текущее и постирригационное состояние почв сельскохозяйственных участков на протяжении 2015–2017 гг. изучалось Н.Б. Хитровым с соавторами (Хитров и др., 2016; Хитров и др., 2017; Хитров и др., 2020). Можно утверждать, что на ранее орошаемых участках происходят глубокие геохимические изменения, которые в ближайшее время приведут к трансформации свойств почв, состояния и качества поверхностных и подземных вод и, следовательно, к пе-

рестройке функционирования агроландшафтов. Неконтролируемый забор воды из верхних водоносных горизонтов для полива приусадебных участков приводит к повышению минерализации подземных вод, в том числе используемых для питьевого водоснабжения. Все эти факторы проявляются на фоне естественных климатических изменений, которые вызовут интенсификацию процессов деградации почв вследствие развития процессов водной и ветровой эрозии, что позволяет рассматривать территорию Равнинного Крыма как потенциальную зону активизации процессов опустынивания (Ергина, 2017; Ергина, Жук, 2017). По сути почвы в современных условиях отражают новый этап эволюции, при этом прогнозировать темпы и направленность процесса без специальных исследований довольно сложно, особенно когда аналогов таких воздействий недостаточно. Это обстоятельство обусловило формирование цели данной работы: охарактеризовать современное состояние почв постирригационных ландшафтов Присивашья для оценки представлений о трендах их дальнейшей эволюции, устойчивости почв и геосистем в целом и разработки стратегии мониторинговых наблюдений территории.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Территория исследования расположена в северо-восточной части Крымского полуострова, восточной части Присивашско-Крымской низменной области (Маринич и др., 2003; Подгородецкий, 1988) (рис. 1). Основные ландшафты – слабодренированные равнины на четвертичных лёссовидно-суглинистых отложениях с каштановыми почвами, в т. ч. солонцеватыми, с полупустынными степями в комплексе с бедноразнотравными (Современные ландшафты Крыма..., 2009). В рельефе Присивашская низменность представлена плоской аккумулятивной слабоволнистой равниной и характеризуется широкими балочными понижениями и обширными водораздельными пространствами. По данным метеостанции Джанкой, среднегодовая температура составляет 11.0 °С, сумма температур выше 10 °С – 3 467, продолжительность безморозного периода – 210–230 дней. Территория Присивашья характеризуется относительной засушливостью, годовая сумма осадков в среднем составляет 437 мм. В 2023 г., предшествовавшем перио-

ду исследований, выпало 532 мм осадков, из них за вегетационный период – 348.7 мм, что немногим выше нормы. Коэффициент увлажнения Высоцкого-Иванова составляет 0.34–0.45, радиационный индекс сухости Будыко – 2.20–2.35, гидротермический коэффициент Селянинова – 0.54–0.60 (Современные ландшафты Крыма..., 2009).



Рис. 1. Местоположение участков исследования на территории Крыма.
Fig. 1. Location of research sites in Crimea.

Поверхностные водотоки практически все преобразованы после строительства Северо-Крымского канала: заключены в искусственные спрямленные русла и использовались для приема дренажных и сбросовых вод с канала. Режим грунтовых вод в районе исследований характеризуется как установившийся. Отмечаются лишь сезонные колебания УГВ с амплитудой 0.2–0.6 м, обусловленные количеством выпавших осадков и работой коллекторно-дренажных сетей, и составляет от 3 до 5 м (согласно данным Крымской гидрогеолого-мелиоративной экспедиции) и зако-

номерно повышается при удалении от берега Сиваша (в окрестностях с. Благодатное (рис. 1) уровень подземных вод достигает 6–8 м). Зональная растительность сохранилась лишь на небольших отдаленных участках, засоленных и не пригодных для выращивания сельскохозяйственных культур. Преобладают галофитные ассоциации в окрестностях ветровых осушек – так называемых “засух”. Злаки представлены бескильницей Фомина (*Puccinellia fominii*), прибрежницей (*Aeluropus littoralis*), житняком (*Agropyron*), разновидностями пырея (*Elytrigia of Crimean region*) (Полевой определитель почв..., 2008). Почвообразующие породы – лёссовидные глины и суглинки (Полевой определитель почв..., 2008).

В пределах территории исследования заложены 4 ключевых участка для изучения свойств почв в различных условиях их использования; все они расположены в границах одной почвенной разности на расстоянии не более 1 км.

Участок Гр 1 – залежный участок – к востоку от с. Благодатное, Джанкойского района, в 5 м от проселочной дороги, с координатами 45.6701389° с. ш.; 34.7974131° в. д. Участок хорошо задернован травянистой растительностью. Проективное покрытие от 80 до 90%. Фитоценоз представлен злаковыми и разнотравными ассоциациями с участием пырея ползучего (*Elytrigia repens*), полыни крымской (*Artemisia taurica*), пижмы тысячелистной (*Tanacetum millefolium*), мятлика лугового (*Poa pratensis*). Встречаются одиночные экземпляры тростника (*Phragmites australis*). Почва лугово-каштановая глубоко солонцеватая (Качинский, 1958) или каштановая квазиглееватая, легкоглинистая на желтобурых суглинках, согласно Полевому определителю почв... (2008). Участок Гр-1 (залежь) выбран в качестве фонового (исходного) объекта для изучения динамики свойств всего ряда почв с различными режимами функционирования: залежь – богара – разновременные постирригационные участки.

Участок Гр 2 с координатами: 45.6702328° с. ш., 34.7970930° в. д., заложен на поле с полевым севооборотом, орошаемом до 1989 г., в настоящее время этот участок находится в постирригационном режиме и засеян озимой пшеницей. Почва классифицируется как агрозем аккумулятивно-карбонатный, тя-

желосуглинистый на желто-бурых суглинках. В публикациях Н.Б. Хитрова, приуроченных к исследованиям постирригационных почв Крыма (Тихоненко, 2009), отмечено, что на лугово-каштановых почв в условиях орошения сформировались агрозоны поверхностно-глеевые ксерометаморфические окисленно-глеевые тяжелосуглинистые на желто-бурых суглинках и глинах (Полевой определитель почв..., 2008), но пахотный горизонт уже через 4 года окислительного режима богарного использования потерял признаки глеевого горизонта. При морфологическом исследовании почвенных профилей постирригационных участков мы также не наблюдали признаков процесса оглеения.

Участок Гр 3 заложен на богаре – участке, который никогда не орошался, с координатами 45.6706118° с. ш.; 34.7982974° в. д. Это поле на момент исследований тоже было засеяно пшеницей. Почва – лугово-каштановая солонцеватая (Качинский, 1958), или каштановая квазиглееватая, тяжелосуглинистая на желто-бурых суглинках, согласно Полевому определителю почв... (2008).

Участок Гр 4 заложен на бывшем до 2014 г. рисовом чеке с координатами 45.6797295° с. ш.; 34.8027810° в. д., в настоящее время в постирригационном режиме, засеян ячменем. Почва – агрозем аккумулятивно-карбонатный (постирригационный), легкоглинистый согласно (Полевой определитель почв..., 2008).

При полевых и лабораторных исследованиях использованы принятые в почвоведении ГОСТы, ДСТУ и методики. Для аналитических исследований отбирали смешанные образцы почвы, соответственно ГОСТу 58595-2019. Гранулометрический состав мелкозема определяли методом пипетки пирофосфатным способом, и микроагрегатный – по Качинскому (ГОСТ 12536-2014) (Качинский, 1958), плотность почвы определяли цилиндром по Н.А. Качинскому – ГОСТ 5180-2015, общую пористость определяли расчетным методом (Вадюнина, Корчагина, 1986). Гумус определяли методом Тюрина в модификации ЦИНАО (ГОСТ 26213-91). Солевой состав почв оценивали на основании определения катионно-анионного состава водной вытяжки (ГОСТ 26423-26428), обменные катионы – по Пфефферу в модификации Молодцова, Игнатовой (Воробьева, 1998) (Определение кальция – комплексометрическим методом, определение суммы кальция и магния –

комплексометрическим методом, определение натрия – методом фотометрии пламени). Степень и химизм засоления почвы оценивали по классификации Базилевич и Панковой (Базилевич, Панкова, 1972). Величину рН водной суспензии – потенциметрически (ГОСТ 26483-85), общее содержание карбонатов кальция – газоволуметрическим методом определения углекислоты карбонатов (по объему CO_2) (Петербургский, 1963).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Орошение, как и иное антропогенное воздействие, влияет на функционирование почв комплексно и неоднозначно (Кольцов, Титков, 2019). Изменяются их физические, химические свойства, характер функционирования и состав биологической составляющей, но “характерные времена” многих почвообразующих процессов четко не определены. Причины трансформации почв при орошении связаны с перераспределением энергетических и вещественных потоков в педосистеме. В основном это привнос илистых частиц с поливной водой, перераспределение тонкодисперсных частиц по профилю, интенсификация процессов вторичного выветривания минеральной части почвы, разрушение почвенной структуры, изменение и перераспределение по профилю органической части, вторичное засоление и другие ресурсопределяющие процессы. Даже после прекращения орошения в почвах гранулометрический состав, плотность, пористость почв и иные физические свойства длительное время отражают в профиле информацию, свидетельствующую о прошлых воздействиях.

Результаты аналитических исследований ключевых участков (табл. 1) свидетельствуют, что по гранулометрическому составу лугово-каштановая почва, сформированная на залежном участке (Гр 1), тяжелая и представлена легкой глиной (содержание физической глины > 50%) с преобладанием илистой фракции. Среднее значение физической глины составляет 61.3%, а илистых фракций – 37.3%. Вниз по профилю содержание физической глины резко уменьшается и в слое 120–140 см и составляет 12.1%, физического песка – 87.9%. В слое 100–140 см преобладает фракция крупной пыли – 50.7%.

Таблица 1. Гранулометрический состав и физические свойства почв Присивашья
Table 1. Granulometric composition and physical properties of soils of the Sivash region

Слой почвы, см	Содержание фракций, мм						Сумма фракций <0.01 мм	Плотность слоения, г/см ³	Пористость, % от объема почвы
	1– 0.25	0.25– 0.05	0.05– 0.01	0.01– 0.005	0.005– 0.001	< 0.001			
Гр 1 залежь									
0–10	0.4	8.4	30.2	11.5	13.0	36.6	61.0	1.31	48
10–33	0.1	8.9	31.4	7.9	14.2	37.6	59.6	1.46	43
33–40	0.0	8.1	28.1	6.8	18.6	38.3	63.8	1.59	39
40–60	0.0	7.6	29.8	8.1	15.6	38.9	62.6	1.63	38
60–80	0.0	7.9	30.2	9.2	15.4	37.2	61.8	1.58	40
80–100	0.0	8.6	32.6	5.8	17.8	35.1	58.7	1.42	46
100–120	5.1	18.3	33.7	7.5	25.5	10.0	43.0	1.51	42
120–140	1.9	18.3	67.8	9.1	1.4	1.6	12.1	1.56	40
Гр 2 постирригационный, 34 года, полевой севооборот									
0–10	0.1	11.1	30.6	8.6	16.9	32.7	58.2	1.35	46
10–36	0.1	8.1	33.9	8.4	15.2	34.3	57.9	1.46	43
36–40	0.0	7.1	30.0	8.8	18.3	35.8	62.9	1.53	42
40–60	0.0	1.9	35.5	8.6	18.2	35.8	62.6	1.53	42
60–73	0.0	6.2	32.1	5.1	22.2	34.4	61.7	1.55	41
76–83	0.1	7.7	29.4	8.2	18.3	36.2	62.8	1.55	41
83–100	0.0	7.2	30.3	7.8	19.8	34.8	62.5	1.58	40
100–120	0.0	2.6	35.6	5.9	19.2	36.7	61.8	1.45	44

Продолжение таблицы 1

Table 1 continued

Слой почвы, см	Содержание фракций, мм						Сумма фракций <0.01 мм	Плотность сложения, г/см ³	Пористость, % от объема почвы
	1– 0.25	0.25– 0.05	0.05– 0.01	0.01– 0.005	0.005– 0.001	< 0.001			
Гр 3 богарный									
0–10	0.1	8.4	32.6	12.9	13.1	32.9	59.0	1.32	48
10–40	0.1	9.3	32.8	11.0	12.1	34.7	57.8	1.41	44
40–60	0.0	6.9	30.3	9.5	18.2	35.1	62.8	1.56	40
60–80	0.0	6.0	33.2	10.2	17.3	33.3	60.8	1.58	40
80–100	0.0	9.4	33.6	8.2	15.4	33.3	56.9	1.57	40
100–120	0.1	13.0	26.0	10.0	16.6	34.3	60.9	1.42	45
Гр 4 постирригационный, 10 лет, рисовый чек									
0–10	0.4	6.1	30.7	13.2	15.4	34.2	62.8	1.47	42
10–30	0.1	6.2	31.1	11.2	16.2	35.2	62.6	1.60	39
30–40	0.1	6.3	30.7	10.2	18.4	34.2	62.9	1.57	40
40–60	0.0	7.7	30.0	11.8	17.5	33.0	62.3	1.57	40
60–80	0.1	8.2	30.0	11.4	17.5	32.8	61.8	1.54	41
80–100	0.1	7.0	31.3	11.9	16.4	33.4	61.7	1.54	41
100–120	0.1	5.3	34.3	10.6	17.3	32.4	60.3	1.57	39

Богарный участок под полевым севооборотом (Гр 3) по гранулометрическому составу неоднородный и представлен в целом легкой глиной (физической глины 59.7%), с преобладанием иловато-крупнопылеватых частиц. Почва в достаточной мере обеспечена илистыми фракциями – 33.9%.

Гранулометрический состав почвы на постирригационном участке возрастом 34 года с полевым севооборотом (Гр 2) в верхнем слое представлен легкой глиной (58.1%), в среднем по профилю – легкой глиной (61.3%) иловато-крупнопылевой.

Под бывшим рисовым чеком (Гр 4) гранулометрический состав однороден по всему профилю и представлен легкой глиной (62.1%) с преобладанием иловато-легкоглинистых фракций, а также пыли средней – 11.5%. Что обусловлено длительным периодом функционирования почвы в режиме периодического затопления водой.

При сравнительной характеристике гранулометрического состава изученных почв Присивашья отметим, что на залежном участке с лугово-каштановой почвой (Гр 1) содержание фракций 1–0.05 мм выше, чем у всех остальных в среднем на 4.3%. На постирригационных участках (Гр 2 и Гр 4), где длительное время ранее осуществлялся полив, содержание песчаных фракций в среднем составляет 6.7%, что на 3.6% меньше, нежели в почвах, функционировавших в автономных и богарных условиях. Различия видны и в содержании пыли мелкой (0.005–0.001 мм). Так, на ранее орошаемых участках ее содержание составляет в среднем 17.7%, а на богаре – 15.3%. Следует отметить увеличение дефляционно-опасной пыли средней (0.01–0.005 мм) на участке бывшего рисового чека (Гр 4), где ее количество составляет 11.5%.

Длительное орошение сказалось на плотности и пористости почв. Это подтверждается аналогичными исследованиями. Исследования плотности почв Присивашья показали, что на всех ключевых участках почва плотная и очень плотная. На залежи, несмотря на то что в среднем слое (40–60 см) плотность достигает критических показателей (1.63 г/см^3), нижележащие горизонты изначально имеют существенно меньшую плотность – 1.42 г/см^3 (табл. 1). На богарном участке (Гр 3) плотность, вследствие длительного воздействия сельскохозяйственной техники при обработ-

ке почвы, изменяется от 1.32 г/см^3 в верхних горизонтах до 1.57 г/см^3 в слое 100 см.

Почвы, функционирующие в постирригационном режиме, характеризуются процессами, направленными на уплотнение. Самая плотная почва по всему профилю зафиксирована на участке бывшего рисового чека, который находится в постирригационном режиме на протяжении 10 лет. На глубине 100 см плотность почвы на этом участке составила 1.56 г/см^3 (табл. 2). На участке (Гр 2), находящемся в постирригационном режиме на протяжении 34 лет, почва в верхних горизонтах более рыхлая ($1.35\text{--}1.51 \text{ г/см}^3$). Плотность увеличивается с глубиной и доходит до очень плотной – 1.58 г/см^3 ниже 60 см.

Интегральным показателем плодородия почв считаются запасы гумуса. При одинаковых или близких относительных параметрах почвы могут значительно различаться по запасам гумуса. Запас гумуса сосредоточен в верхнем плодородном слое. По содержанию гумуса почвы всех исследуемых участков относятся к малогумусным. На залежном участке общая мощность гумусового горизонта или слоя почвы с содержанием гумуса более 1.5% составляет 33 см. В нем сосредоточено 66% всех запасов гумуса. Рассчитанные запасы гумуса в метровом слое на залежи составляют 162 т/га. В верхнем пахотном слое больше всего гумуса содержится на участке, обустроенном в прошлом под рисовый чек (Гр 4) – 3.6%, но с глубины 30 см его содержание резко снижается до 1.5%, что отражается на общих запасах гумуса в метровом слое – 119 т/га. Аналогичную тенденцию функционирования почв под орошаемыми рисовыми агроценозами отмечают в своих работах крымские ученые (Кольцов, Титков, 2019).

Обращает на себя внимание тот факт, что максимальные рассчитанные запасы гумуса в метровом слое наблюдаются на участке в постирригационном режиме функционирования длительностью 34 года (Гр 2) – 222 т/га. О снижении содержания гумуса в пахотном горизонте орошаемых почв свидетельствуют работы отечественных ученых (Суюндуков, 1998). Но в то же время отмечается, что для длительно орошаемых на протяжении более 50 лет черноземов Украины характерно увеличение его количества на глубине 70–100 см на фоне небольшого снижения (около

1%) гумуса в пахотном слое (Новикова, 1971; Носко, 1989). Такая же закономерность выявлена и в исследованиях южных черноземов и темно-каштановых почв Херсонской области, орошавшихся на протяжении 40 лет. Авторы объясняют это явление следствием выщелачивания кальция и миграции по профилю гумусовых веществ, не закрепленных минеральной частью почвы (Лозовицкий, Ткаченко, 1992; Лозовицкий, Каленюк, 2001). В нашем случае в профиле почвы даже после 34-летнего периода отсутствия орошения сохраняются свидетельства прошлых воздействий.

Реакция почвенной среды во всех вариантах щелочная и сильнощелочная, по всему профилю pH составляет 7.62–8.94 (табл. 2).

Наиболее выщелоченными от карбонатов являются почвы залежного и богарного участков, в слое 0–40 см содержание CaCO_3 составило 1.7 и 0.8% соответственно. Ранее орошаемые участки классифицировались как слабокарбонатные – содержание карбонатов в слое 0–40 см в них варьировало от 4.4 до 4.8. Глубже 40 см содержание карбонатов существенно увеличивается и в среднем достигает 11–17% (табл. 2).

Во всех вариантах почва в достаточной мере обеспечена фосфором и калием в корнеобитаемом слое (табл. 2).

Почва на залежном участке (Гр 1) засолена легкорастворимыми солями с глубины 80 см, сумма солей составила 1.047–1.576% (табл. 3). По глубине залегания (верхней границе) солевого горизонта почва этого участка, функционирующего в условиях автономных факторов почвообразования, относится к глубокосолончаковой.

Из солей преобладают сульфаты – в слое 80–140 см их содержание составило 0.681–0.979%. Сода встречается в количестве 0.04–0.16 смоль(экв)/кг в слое 33–80 см (табл. 3). Тип засоления в слое 80–140 см – сульфатный и хлоридно-сульфатный, по катионному составу натриево-кальциевый и кальциево-натриевый. Степень засоления сильная. В составе солей присутствуют вредные для многолетних растений хлориды и сульфаты натрия и магния.

Таблица 2. Общая характеристика исследуемых почв

Table 2. General characteristics of the studied soils

Глубина, см	Гумус, %	Запасы гумуса, т/га	CaCO ₃ , %	pH водный	Нитраты, мг/кг	P ₂ O ₅ , мг/кг	K ₂ O, мг/кг
Гр 1 залежь							
0–10	3.0	39	1.7	7.62	<1.0	56.1	1041
10–33	1.9	61	1.7	8.22	<1.0	6.5	359
33–40	1.0	11	17.3	8.71	<1.0	3.5	123
40–60	0.6	20	18.5	8.60	<1.0	5.1	104
60–80	0.4	13	17.8	8.94	<1.0	8.2	114
80–100	0.4	11	11.8	8.37	<1.0	6.6	117
100–120	-	-	11.2	8.24	3.4	3.2	92
120–140	-	-	12.7	8.23	4.2	2.7	74
Гр 2 постирригационный, 34 года, полевой севооборот							
0–10	2.2	29	4.4	7.95	<1.0	32.2	492
10–36	1.7	79	5.3	8.10	<1.0	7.1	259
36–40	0.9	26	14.1	8.28	<1.0	4.8	164
40–60	0.8	24	15.8	8.40	3.3	2.0	118
60–73	0.9	23	13.8	8.40	5.0	3.1	102
76–83	1.0	32	12.7	8.41	5.9	5.6	144
83–100	0.7	7	17.2	8.56	4.6	5.8	116
100–120	-	-	16.7	8.56	6.0	6.8	108

Продолжение таблицы 2

Table 2 continued

Глубина, см	Гумус, %	Запасы гумуса, т/га	CaCO ₃ , %	pH водный	Нитраты, мг/кг	P ₂ O ₅ , мг/кг	K ₂ O, мг/кг
Гр 3 богарный							
0–10	2.2	29	0.6	8.04	<1.0	64.6	287
10–40	1.7	78	0.9	8.27	<1.0	17.3	212
40–60	0.8	25	15.4	8.92	3.2	7.2	107
60–80	0.6	17	17.4	8.93	4.8	10.5	96
80–100	0.4	12	16.6	8.34	3.9	6.9	91
100–120	-	-	15.9	8.41	2.8	4.5	107
Гр 4 постирригационный, 10 лет, рисовый чек							
0–10	3.6	53	3.5	8.00	<1.0	82.9	692
10–30	1.5	49	5.4	8.21	<1.0	11.5	230
30–40	0.7	11	11.8	8.26	<1.0	6.5	173
40–60	0.5	16	13.6	8.43	<1.0	8.3	108
60–80	0.4	12	11.8	8.38	<1.0	8.9	127
80–100	0.4	12	10.1	8.44	<1.0	7.1	115
100–120	-	-	10.8	8.89	<1.0	6.5	114

Таблица 3. Катионно-анионный состав водной вытяжки почв Присивашья (смоль(экв)/кг)
Table 3. Cation-anion composition of the water extract of soils of the Sivash region (cmol(eq)/kg)

Глубина, см	Сумма солей, %	CO_3^{2-}	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	Сумма токсичных солей, %
Гр 1 залежь									
0–10	0.049	0	0.56	0.08	0.02	0.40	0.20	0.06	0.017
10–33	0.056	0	0.56	0.08	0.12	0.40	0.30	0.06	0.023
33–40	0.053	0.04	0.50	0.08	0.11	0.30	0.30	0.13	0.027
40–60	0.055	0.04	0.58	0.12	0.01	0.20	0.20	0.35	0.038
60–80	0.107	0.16	1.12	0.12	0.01	0.10	0.20	1.11	0.100
80–100	1.047	0	0.36	0.96	14.18	5.80	2.70	7.00	0.647
100–120	1.575	0	0.28	3.04	20.38	11.40	3.50	8.80	0.797
120–140	1.576	0	0.24	4.80	19.03	10.50	3.90	9.67	0.861
Гр 2 постирригационный, 34 года, полевой севооборот									
0–10	0.137	0	0.36	0.12	1.55	1.40	0.50	0.13	0.038
10–36	0.074	0	0.36	0.16	0.57	0.60	0.40	0.09	0,028
36–40	0.056	0,04	0.46	0.12	0.18	0.50	0.20	0.10	0.017
40–60	0.045	0,04	0.46	0.08	0.05	0.30	0.20	0.13	0.022
60–73	0.055	0,08	0.52	0.08	0.09	0.40	0.20	0.17	0.023
76–83	0.061	0,08	0.60	0.12	0.06	0.20	0.40	0.26	0.045
83–100	0.066	0,08	0.60	0.24	0.01	0.30	0.30	0.33	0.041
100–120	0.065	0,08	0.56	0.28	0.03	0.30	0.20	0.45	0.042

Продолжение таблицы 3

Table 3 continued

Глубина, см	Сумма солей, %	CO_3^{2-}	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	Сумма токсичных солей, %
Гр 3 богарный									
0–10	0.049	0	0.56	0.08	0.02	0.40	0.20	0.06	0.017
10–40	0.057	0	0.60	0.04	0.12	0.20	0.32	0.24	0.041
40–60	0.098	0.04	0.84	0.36	0.02	0.40	0.04	0.82	0.060
60–80	0.104	0.04	0.88	0.52	0	0.12	0.12	1.20	0.094
80–100	1.081	0	0.32	0.72	15.44	6.64	6.00	3.84	0.624
100–120	0.559	0	0.36	2.16	6.17	2.32	2.60	3.77	0.397
Гр 4 постирригационный, 10 лет, рисовый чек									
0–10	0.064	0	0.64	0.28	0	0.52	0.36	0.04	0.023
10–30	0.062	0	0.60	0.08	0.17	0.44	0.36	0.05	0.026
30–40	0.085	0	0.68	0.16	0.37	0.48	0.60	0.13	0.046
40–60	0.065	0	0.64	0.12	0.15	0.32	0.48	0.11	0.039
60–80	0.063	0	0.60	0.28	0.02	0.36	0.40	0.14	0.034
80–100	0.062	0	0.64	0.24	0	0.28	0.44	0.16	0.039
100–120	0.058	0	0.60	0.20	0	0.28	0.36	0.16	0.035

Аналогичная химическая характеристика почвы, функционирующей в богарных условиях (Гр 3). На этом участке почва засолена легкорастворимыми солями с глубины 80–120 см, сумма солей составила 0.559–1.081% (табл. 3). По глубине залегания (верхней границе) солевого горизонта почва неорошаемого участка относится к глубокосолончаковой. Из солей преобладают сульфаты – в слое 80–120 см их содержание составило 0.296–0.742% и содержание хлоридов в слое 40–120 см составило 0.017–0.076% (содержание хлоридов превышает порог токсичности в 0.010%). Сода встречается в количестве 0.04 смоль(экв)/кг в слое 40–80 см (табл. 3). Тип засоления в слое 80–120 см – сульфатный, по катионному составу магниевый-кальциевый и магниевый-натриевый. В составе солей присутствуют вредные для многолетних растений хлориды и сульфаты натрия и магния.

После прекращения орошения 34 года назад на участке, занятом в настоящее время полевым севооборотом (Гр 2), почва не засолена по всей глубине почвенного профиля, сумма солей не превышает 0.074% по профилю (табл. 3). В составе легкорастворимых солей, переходящих в водную вытяжку, обнаружена сода в незначительных концентрациях на глубине 36–120 см – 0.04–0.08 смоль(экв)/кг почвы (табл. 3), минимальное количество хлоридов (0.08–0.010%, на глубине 100–120 см содержание хлоридов достигает порога токсичности 0.010%) и сульфатов (0.1–0.074 %) (табл. 3). Химизм засоления почвы в основном хлоридный и сульфатно-хлоридный, реже хлоридно-сульфатный, а на глубине 0–10 см – сульфатный. Катионный состав в основном магниевый-кальциевый, на глубине 76–83 см – натриево-магниевый, на 83–100 см – магниевый-натриевый, 100–120 см – кальциевый-натриевый.

Таким образом, даже через 34 года после прекращения орошения в почве сохраняются свидетельства интенсивного выноса солей из почвенного профиля поливными водами в прошлом.

После ввода в эксплуатацию в 1960-х годах рисовых систем на Крымском полуострове, в частности в Присивашье, почвы этих регионов стали подвергаться интенсивной промывке от легкорастворимых солей водой, поступающей по Северо-Крымскому каналу (Хитров и др., 2020).

В результате этого сильнозасоленные солончаковые солон-

цы и солончаковатые лугово-каштановые почвы Крыма по мере их использования под культуру риса путем затопления чеков становились слабозасоленными или незасоленными в слое 0–100 см. После прекращения возделывания риса, бывшие рисовые чеки стали использоваться в полевых севооборотах в основном под посевы ячменя и многолетних трав. За 10 лет функционирования в новых условиях на участке бывшего рисового чека (Гр 4) почва на всю глубину почвенного профиля осталась незасоленной, сумма солей не превышает 0.085% (табл. 3). В составе легкорастворимых солей, переходящих в водную вытяжку, отсутствует наиболее токсичная для растений соль – сода – карбонат натрия, минимальное количество хлоридов (0.3–0.010%, на глубине 0–10 и 60–80 см содержание хлоридов достигает порога токсичности (0.010%) и сульфатов (0.1–0.018%). Химизм засоления почвы в основном хлоридно-сульфатный, а на глубине 60–80 см – хлоридный и сульфатно-хлоридный; по катионному составу почвы в основном кальциево-магниевого, на глубине 0–30 см – магниево-кальциевого.

На всех участках Гр 1–4 среди обменных катионов преобладает кальций, количество которого с повышением степени солонцеватости закономерно уменьшается (рис. 2а), а количество магния и натрия – увеличивается (рис. 2б и рис. 2в). Содержание кальция от суммы обменных катионов на обследованных участках закономерно снижается по профилю (рис. 2а).

На всех участках (Гр 1–4) очень высокая доля магния. Изменения в содержании обменных катионов (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+}) по профилю (рис. 2) связаны, прежде всего, с процессами засоления–рассоления, а не являются диагностическим признаком солонцеватости в верхней части профиля, где доля обменного Na^{+} , как правило, не превышает 5%.

По сумме обменных катионов выделяется залежный участок с максимальными значениями показателя от 23.25 до 32.71 смоль(экв)/кг, и богарный – от 21.17 до 29.87 смоль(экв)/кг (рис. 3).

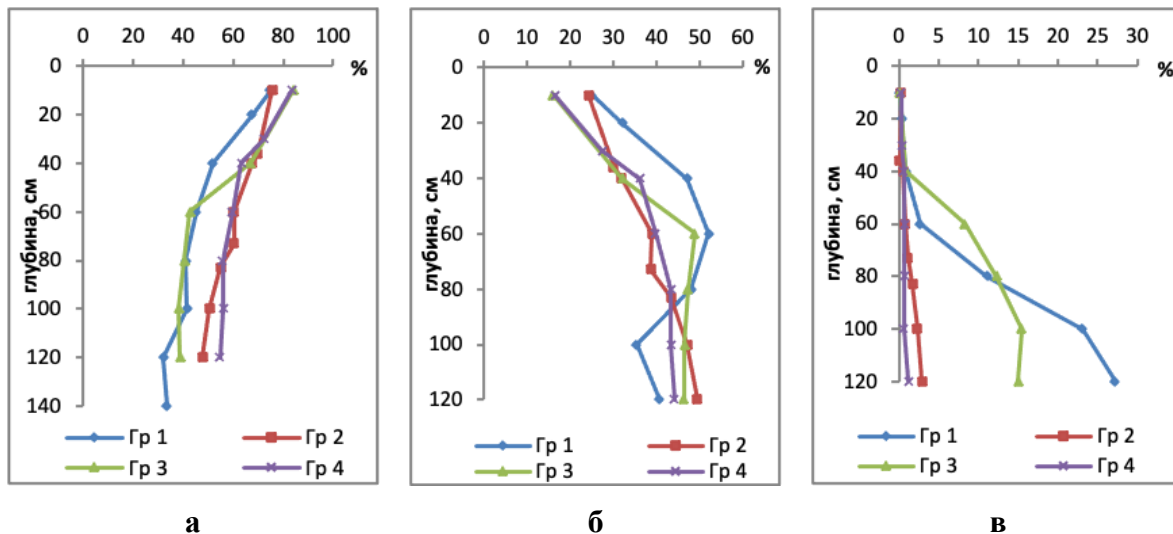


Рис. 2. Состав обменных катионов в почвах (% от суммы катионов): а) Ca^{2+} , б) Mg^{2+} , в) Na^+ .

Условные обозначения: Gr1 – залежь, Gr2 – постирригационный, возрастом 34 года, полевой севооборот, Gr3 – богарный, Gr4 – постирригационный, возрастом 10 лет, бывший рисовый чек.

Fig. 2. Exchangeable cation composition in soils (% of total cations): а) Ca^{2+} , б) Mg^{2+} , в) Na^+ .

Legend: Gr1 – fallow land; Gr2 – post-irrigation, 34 years after cessation of irrigation, field crop rotation; Gr3 – rainfed (non-irrigated); Gr4 – post-irrigation, 10 years after cessation, former rice paddy.

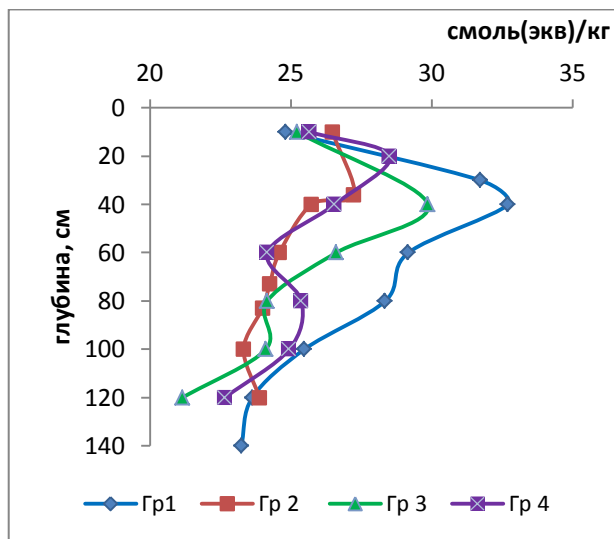


Рис. 3. Сумма поглощенных оснований, смол(экв)/кг. Гр1 – залежь, Гр 2 – постирригационный, возрастом 34 года, полевой севооборот, Гр 3 – богарный, Гр 4 – постирригационный, возрастом 10 лет, бывший рисовый чек.

Fig. 3. Sum of exchangeable bases, cmol(eq)/kg. Гр1 – fallow land; Гр 2 – post-irrigation, 34 years after cessation of irrigation, field crop rotation; Гр 3 – rainfed (non-irrigated); Гр 4 – post-irrigation, 10 years after cessation, former rice paddy.

Затем следуют постирригационные участки: 23.33–27.24 смол(экв)/кг на участке с полевым севооборотом, и 22.67–28.52 смол(экв)/кг – на бывшем рисовом чеке соответственно, что является типичным уровнем для почв данного региона и свидетельствует о сохранении ими высокой поглотительной способности.

ВЫВОДЫ

Исследования разновозрастных постирригационных агроландшафтов свидетельствуют о том, что в почвах на протяжении довольно длительного времени сохраняются свойства, сформиро-

ванные на протяжении полувекового орошения. Гранулометрический состав претерпевает незначительные изменения. Все варианты исследованных лугово-каштановых солонцеватых почв тяжелые по гранулометрическому составу, отличаются высокой плотностью сложения и низкой пористостью. Обработка почвы сельскохозяйственной техникой способствует ухудшению физических свойств почвы в подпахотном горизонте.

Реакция почвенной среды во всех вариантах щелочная и сильнощелочная, по всему профилю pH составляет 7.62–8.94.

Содержание гумуса в верхнем пахотном слое в сравнении с залежным участком (2.95%) в агрогенных вариантах снижено (2.16–2.23%), за исключением бывшего рисового чека (3.60%). По глубине залегания (верхней границе) солевого горизонта почва залежного и богарного участка относится к глубокосолончаковой. За время полувекового функционирования агроландшафтов в условиях орошения произошла значительная трансформация химического состава почв. Почвы на постирригационных участках трансформировались в незасоленные варианты и сохраняют эту тенденцию на протяжении 34 лет. На участках под бывшим рисовым чеком зафиксирована аналогичная ситуация – через 10 лет после прекращения орошения почва остается незасоленной по всему профилю до глубины 120 см.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аринушкина Е.В.* Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1970. 488 с.
2. *Базилевич Н.И., Панкова Е.И.* Опыт классификации почв по содержанию токсичных солей и ионов // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 1972. Вып. 5. С. 36–40.
3. *Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А.* Методы исследования физических свойств почв. М.: Агропромиздат, 1986. 416 с.
4. *Воробьева Л.А.* Химический анализ почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1998. 272 с.
5. ГОСТ 26483-85. Почвы. Приготовление солевой вытяжки и определение ее pH по методу ЦИНАО (введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 23.06.2022 N 519-ст с 01.01.2023). URL: <https://www.docs.cntd.ru/document/1200184943?marker>.

6. ГОСТ 5180-2015. ГОСТ 5180-84. Межгосударственный стандарт. Грунты Методы лабораторного определения физических характеристик (введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 1.04.2016). URL: https://www.euro-test.ru/Pub.Lib/Normativ_docs/GOST5180.pdf.
7. ГОСТ 58595-2019. Межгосударственный стандарт. Почвы. Отбор проб (введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 10 октября 2019 г. № 954-). URL: <https://www.files.stroyinf.ru/Data/719/71989.pdf>.
8. *Драган Н.А.* Влияние орошения на почвенный покров равнинного Крыма / Вопросы развития Крыма. Симферополь: Таврия, 1997. Вып. 4. С. 61–66.
9. *Ергина Е.И.* Пространственно-временные закономерности процессов современного почвообразования на Крымском полуострове. Симферополь: ИТ “АРИАЛ”, 2017. 224 с.
10. *Ергина Е.И., Жук В.О.* Влияние современных тенденций климата на состояние эрозионно опасных агроландшафтов и оценка почвообразующего потенциала природных факторов Крыма // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2017. № 3 (65). С. 175–178.
11. *Ещенко Е.Г., Ещенко С.И., Татаринцев В.Л., Татаринцев Л.М.* Влияние орошения на физические и водно-физические свойства агропочв // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2018. № 7 (165). С. 25–42.
12. *Качинский Н.А.* Механический и микроагрегатный состав почвы, методы его изучения. М.: Изд-во АН СССР, 1958. 192 с.
13. Классификация и диагностика почв СССР. М.: Колос, 1977. 221 с.
14. *Кольцов С.А., Титков А.А.* Трансформация плодородия солонцовых почв крымского Присивашья под влиянием рисосеяния и оптимизация его параметров Симферополь: ИТ “Ариал”, 2019. 420 с.
15. *Кушнарёва А.В., Безуглова О.С.* Влияние орошения на свойства почв. Обзор // Живые и биокосные системы. 2023. № 46. URL: <https://www.jbks.ru/archive/issue-46/article-4>.
16. *Лозовицкий П.С., Каленюк С.М.* Изменение свойств южных черноземов при длительном орошении минерализованными водами // Почвоведение. 2001. № 4. С. 478–495.
17. *Лозовицкий П.С., Ткаченко И.В.* Влияние орошения на свойства и плодородие темно-каштановых почв // Почвоведение. 1992. № 5. С. 75–85.
18. *Любимова И.Н.* Современные процессы почвообразования в распаханых и мелиорированных комплексах сухостепной и

полупустынной зон // Почвообразовательные процессы. М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 2006. С. 390–411.

19. Любимова И.Н., Мотузов В.Я. Постмелиоративная эволюция солонцовых комплексов сухостепной зоны // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2005. Вып. 57. С. 3–9. DOI:

20. Любимова И.Н., Мотузов В.Я., Бондарев А.Г. Современные тенденции изменения свойств целинных и постирригационных почв солонцовых комплексов Приволжской гряды // Почвоведение. 2011. № 10. С. 1260–1269. URL: <https://bulletin.esoil.ru/jour/article/view/400>.

21. Маринич О.М., Пархоменко Г.О., Петренко О.М., Шищенко П.Г. Удосконалена схема фізико-географічного районування України // Український географічний журнал. 2003. № 1. С. 16–20.

22. Мотузов В.Я., Любимова И.Н., Бондарев А.Г. Солевой режим постирригационных почв Кисловской оросительной системы (Волгоградская область) // Почвоведение. № 5. 2009. С. 567–574.

23. Муха В.Д. Естественнo-антропогенная эволюция почв (общие закономерности и зональные особенности). М.: Колос, 2004. 271 с.

24. Новикова А. Влияние орошения на почву // Орошаемое земледелие на Украине. Киев, 1971. С. 101–106.

25. Новикова А.Ф., Конюшкова М.В., Ло Гэпин. Динамика процессов засоления–рассоления почв участка “Червленое” Светлоярской оросительной системы в ирригационный и постирригационный периоды // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2009. Вып. 63. С. 16–24.

26. Носко Б.С. Влияние длительного орошения на физико-химические свойства почв // Повышение плодородия орошаемых земель. Киев: Урожай, 1989. С. 13–19.

27. Петербургский А.В. Практикум по агрономической химии. М.: Сельхозиздат, 1963. 592 с.

28. Подгородецкий П.Д. Крым. Природа. Симферополь: Таврия, 1988. 192 с.

29. Полевой определитель почв России. М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 2008. 182 с.

30. Современные ландшафты Крыма и сопредельных территорий / под ред. Е.А. Позаченюк. Симферополь: Бизнес-Информ, 2009. 672 с.

31. Суюндуков Я.Т. Влияние орошения на химические свойства чернозема обыкновенного Зауралья // Почвоведение. 1998. № 8. С. 942–947.

32. Тихоненко Д.Г. Еlemenтарні ґрунтові процеси (ЕГП) при акумулятивному ґрунтоутворенні // Вісник ХНАУ. Ґрунтознавство. 2011. № 1. С. 145–147.

33. Турусов В.И., Чевердин Ю.И. Особенности и направленность изменения качественных свойств черноземов в постмелиоративный период // Достижения науки и техники АПК. 2015. Т. 29. № 1. С. 13–16.
34. Хитров Н.Б., Роговнева Л.В., Паитецкий В.С. Изменение засоленности почв и грунтовых вод рисовых систем Присивашской низменности после прекращения орошения // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2020. Вып. 102. С. 70–102. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-102-70-102>.
35. Хитров Н.Б., Клименко О.Е., Роговнева Л.В., Дунаева Е.А., Попович В.Ф. Долговременные последствия орошения почв водами Северо-Крымского канала в садах // Таврический вестник аграрной науки. № 1 (9). 2017. С. 87–99.
36. Хитров Н.Б., Роговнева Л.В., Дунаева Е.А., Попович В.Ф., Паитецкий В.С., Клименко О.Е. Постирригационное состояние пахотных почв степного Крыма // Таврический вестник аграрной науки. № 1 (5). 2016. С. 91–110.
37. Ergina E.I., Zhuk V.O. Spatiotemporal Variability of the Climate and Dangerous Hydrometeorological Phenomena on the Crimean Peninsula // Russian Meteorology and Hydrology. 2019. Vol. 44. Iss. 7. P. 494–500.

REFERENCES

1. Arinushkina E.V., *Manual on chemical analysis of soils*, Moscow: Moscow University Press, 1970, 488 p. (In Russ.)
2. Bazilevich N.I., Pankova E.I., Experience in classification of soils by the content of toxic salts and ions, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 1972, Vol. 5, pp. 36–40. (In Russ.)
3. Vadyunina A.F., Korchagina Z.A., *Methods for studying the physical properties of soils*, Moscow: Agropromizdat, 1986, 416 p. (In Russ.)
4. Vorobieva L.A., *Chemical analysis of soils*, Moscow: Moscow University Press, 1998, 272 p. (In Russ.)
5. State Standard 26483-85. Soils. Preparation of salt extract and determination of its pH by the CINA0 method (introduced by Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology No. 519-st of 23.06.2022, effective from 01.01.2023). URL: <https://www.docs.cntd.ru/document/1200184943?marker>. (In Russ.)
6. State Standard 5180-2015. GOST 5180-84. Soils. Laboratory methods for determination of physical characteristics (introduced by Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology of 01.04.2016). URL: https://www.euro-test.ru/Pub.Lib/Normativ_docs/GOST5180.pdf. (In Russ.)

7. State Standard 58595-2019. Soils. Sampling (introduced by Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology No. 954-st of 10 October 2019). URL: <https://www.files.stroyinf.ru/Data/719/71989.pdf>. (In Russ.)
8. Dragan N.A., Effect of irrigation on the soil cover of the Crimean Lowland, In: *Issues of Crimean development: collected papers*, Simferopol: Tavria, 1997, Iss. 4, pp. 61–66. (In Russ.)
9. Ergina E.I., *Spatial-temporal patterns of modern soil formation processes on the Crimean Peninsula*, Simferopol: IT “ARIAL”, 2017, 224 p. (In Russ.)
10. Ergina E.I., Zhuk V.O., Influence of modern climate trends on the state of erosion-prone agricultural landscapes and assessment of soil-forming potential of natural factors in Crimea, *Izvestia of Orenburg State Agrarian University*, 2017, No. 3 (65), pp. 175–178. (In Russ.)
11. Eshchenko E.G., Eshchenko S.I., Tatarintsev V.L., Tatarintsev L.M., Effect of irrigation on physical and water-physical properties of agricultural soils, *Bulletin of Altai State Agricultural University*, 2018, No. 7 (165), pp. 25–42. (In Russ.)
12. Kachinsky N.A., *Mechanical and microaggregate composition of soils and methods for its study*, Moscow: USSR Academy of Sciences Press, 1958, 192 p. (In Russ.)
13. *Classification and diagnostics of soils of the USSR*, Moscow: Kolos, 1977, 221 p. (In Russ.)
14. Koltsov S.A., Titkov A.A., *Transformation of fertility of solonetz soils of the Crimean Sivash region under the influence of rice cultivation and optimization of its parameters*, Simferopol: IT “Arial”, 2019, 420 p. (In Russ.)
15. Kushnareva A.V., Bezuglova O.S., Effect of irrigation on soil properties. A review, *Living and Bio-inert Systems*, 2023, No. 46, URL: <https://www.jbks.ru/archive/issue%E2%80%919146/article%E2%80%91914>. (In Russ.)
16. Lozovitsky P.S., Kalenyuk S.M., Changes in the properties of southern chernozems under long-term irrigation with mineralized waters, *Eurasian Soil Science*, 2001, No. 4, pp. 478–495. (In Russ.)
17. Lozovitsky P.S., Tkachenko I.V., Effect of irrigation on the properties and fertility of dark chestnut soils, *Eurasian Soil Science*, 1992, No. 5, pp. 75–85. (In Russ.)
18. Lyubimova I.N., Modern soil-formation processes in arable and reclaimed complexes of the dry-steppe and semidesert zones, In: *Soil-formation processes*, Moscow: Dokuchaev Soil Science Institute, 2006, pp. 390–411. (In Russ.)
19. Lyubimova I.N., Motuzov V.Ya., Post-reclamation evolution of solonetz complexes in the dry-steppe zone, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2005, Iss. 57, pp. 3–9. (In Russ.)

20. Lyubimova I.N., Motuzov V.Ya., Bondarev A.G., Current trends in changes of properties of virgin and post-irrigation soils of solonetz complexes of the Volga Upland, *Eurasian Soil Science*, 2011, No. 10, pp. 1260–1269. (In Russ.)
21. Marinich O.M., Parkhomenko G.O., Petrenko O.M., Shishchenko P.G., Improved scheme of physical-geographical zoning of Ukraine, *Ukrainian Geographical Journal*, 2003, No. 1, pp. 16–20. (In Russ.)
22. Motuzov V.Ya., Lyubimova I.N., Bondarev A.G., Salt regime of post-irrigation soils of the Kislovskaya irrigation system (Volgograd region), *Eurasian Soil Science*, 2009, No. 5, pp. 567–574. (In Russ.)
23. Mukha V.D., *Natural-anthropogenic evolution of soils (general patterns and zonal features)*, Moscow: Kolos, 2004, 271 p. (In Russ.)
24. Novikova A., Effect of irrigation on soil, In: *Irrigated agriculture in Ukraine*, Kyiv, 1971, pp. 101–106. (In Russ.)
25. Novikova A.F., Konyushkova M.V., Lo Gepin, Dynamics of salinization-desalinization processes in soils of the “Chervlenoe” site of the Svetloyarsk irrigation system during irrigation and post-irrigation periods, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2009, Iss. 63, pp. 16–24. (In Russ.)
26. Nosko B.S., Effect of long-term irrigation on physicochemical properties of soils, In: *Improving the fertility of irrigated lands*, Kyiv: Urozhai, 1989, pp. 13–19. (In Russ.)
27. Petersburgsky A.V., *Practical course on agrochemistry*, Moscow: Selkhozizdat, 1963, 592 p. (In Russ.)
28. Podgorodetsky P.D., *Crimea: Nature: Reference edition*, Simferopol: Tavria, 1988, 192 p. (In Russ.)
29. *Field guide for soils of Russia*, Moscow: Dokuchaev Soil Science Institute, 2008, 182 p. (In Russ.)
30. Pozachenyuk E.A. (Ed.), *Modern landscapes of Crimea and adjacent territories*, Simferopol: Business-Inform, 2009, 672 p. (In Russ.)
31. Suyundukov Ya.T., Effect of irrigation on chemical properties of ordinary chernozem in the Trans-Urals, *Eurasian Soil Science*, 1998, No. 8, pp. 942–947. (In Russ.)
32. Tikhonenko D.G., Elementary soil processes (ESP) in accumulative soil formation, *Bulletin of KhNAU. Soil Science*, 2011, No. 1, pp. 145–147. (In Russ.)
33. Turusov V.I., Cheverdin Yu.I., Features and direction of changes in the qualitative properties of chernozems in the post-ameliorative period, *Achievements of Science and Technology of the Agro-Industrial Complex*, 2015, Vol. 29, No. 1, pp. 13–16. (In Russ.)
34. Khitrov N.B., Rogovneva L.V., Pashtetsky V.S., Changes in soil salinity and groundwater of rice systems of the Sivash Lowland after cessation of irri-

gation, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2020, Vol. 102, pp. 70–102, DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-102-70-102>. (In Russ.)

35. Khitrov N.B., Klimenko O.E., Rogovneva L.V., Dunaeva E.A., Popovich V.F., Long-term consequences of irrigation of soils with waters of the North-Crimean Canal in orchards, *Taurida Herald of Agrarian Sciences*, 2017, No. 1 (9), pp. 87–99. (In Russ.)

36. Khitrov N.B., Rogovneva L.V., Dunaeva E.A., Popovich V.F., Pashtetsky V.S., Klimenko O.E., Post-irrigation state of arable soils in the steppe Crimea, *Taurida Herald of Agrarian Sciences*, 2016, No. 1 (5), pp. 91–110. (In Russ.)

37. Ergina E.I., Zhuk V.O., Spatiotemporal variability of the climate and dangerous hydrometeorological phenomena on the Crimean Peninsula, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2019, Vol. 44, Iss. 7, pp. 494–500.

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2026-128-147-173



Ссылки для цитирования:

Захарченко А.В., Пасько О.А., Горячкин В.Н., Тигеев А.А. Содержание подвижных форм Cd и Pb в почвах земель сельскохозяйственного назначения и нормирование их загрязнения // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2026. Вып. 128. С. 147-173. DOI: 10.19047/0136-1694-2026-128-147-173

Cite this article as:

Zakharchenko A.V., Pasko O.A., Goryachkin V.N., Tigeev A.A., The content of mobile forms of Cd and Pb in agricultural soils and standardization of their pollution, Dokuchaev Soil Bulletin, 2026, V. 128, pp. 147-173, DOI: 10.19047/0136-1694-2026-128-147-173

Благодарность:

Работа выполнена в соответствии с государственным заданием Министерства науки и высшего образования РФ (№ FWRZ-2026-0022).

Acknowledgments:

The work was performed in accordance with the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (No. FWRZ-2026-0022).

Содержание подвижных форм Cd и Pb в почвах земель сельскохозяйственного назначения и нормирование их загрязнения

© 2026 г. А. В. Захарченко^{1*}, О. А. Пасько^{2**},
В. Н. Горячкин^{3***}, А. А. Тигеев^{1****}

¹Тюменский научный центр СО РАН,
Институт проблем освоения Севера, Россия,
625026, Тюмень, ул. Малыгина, 86,

* <https://orcid.org/0000-0001-9201-5733>, e-mail: avzakh@gmail.com,
*** <https://orcid.org/0000-0001-5449-5086>, e-mail: trruubbaa@mail.ru.

²Национальный открытый институт, Россия,
197183, Санкт-Петербург, ул. Сестрорецкая, д. 6,
** <https://orcid.org/0000-0001-8322-834X>, e-mail: pasko@noispb.ru.

³Ленинградский филиал ФГБУ "РосАгрохимслужба", Россия,
196608, Санкт-Петербург, шоссе Подбельского, 9,
*** e-mail: vova.goryk1978@mail.ru.

*Поступила в редакцию 26.06.2025, после доработки 21.10.2025,
принята к публикации 29.04.2026*

Резюме: Оценка загрязненности подвижными формами Cd и Pb агрогенных почв вызвана необходимостью введения региональных нормативов, которые основаны на принципах предела baseline (ULBL). Показана зависимость их содержания от гранулометрического состава почв (1113 наблюдений). Использование кластерного анализа позволило установить для суглинков пределы фонового содержания подвижного Pb (менее 5.53 ± 0.08 мг/кг). Кластеры, загрязненные подвижным Pb, имеют достоверно более высокие содержания органического углерода (%), подвижного фосфора и калия, pH_{KCl} . Пороговое содержание подвижного свинца (ULBL) – 11.5 мг/кг. Оно выше ПДК (6 мг/кг) и отражает допустимое антропогенное воздействие. Превышение порога Pb отмечено на 6% почв изученной площади. Их местоположение охватывает северные, центральные и южные регионы Ленинградской области. Фоновое значение содержания подвижного Cd менее 0.05 и не более 0.08, предельное пороговое значение концентрации подвижного Cd равно 0.16 мг/кг (ULBL). Загрязненные Cd земли, превышающие ULBL, распространены с севера на юг относительно областного центра и охватывают 6.2% от общей площади. Показано увеличение обобщенных показателей качества земель, таких как индекс окультуренности и комплексный агрохимический показатель с переходом от фоновых значений содержания Pb и Cd за пределы ULBL. В случае залежных земель установлено увеличение разброса значений по Pb и достоверное увеличение Cd относительно пашни.

Ключевые слова: подвижный свинец; подвижный кадмий; загрязнение почв; пороговое значение; фоновое содержание; Ленинградская область.

The content of mobile forms of Cd and Pb in agricultural soils and standardization of their pollution

© 2026 A. V. Zakharchenko^{1*}, O. A. Pasko^{2**},
V. N. Goryachkin^{3***}, A. A. Tigeev^{1****}

¹Tyumen Scientific Center SB RAS,

Institute of Problems of the Development of the North,

86 Malygina str., Tyumen 625026, Russian Federation,

*<https://orcid.org/0000-0001-9201-5733>, e-mail: avzakh@gmail.com,

***<https://orcid.org/0000-0001-5449-5086>, e-mail: ttrruubbaa@mail.ru.

²*National Open Institute Saint Petersburg,
6 Sestroretskaya str., Saint Petersburg 197183, Russian Federation,
**<https://orcid.org/0000-0001-8322-834X>, e-mail: pasko@noispb.ru.*

³*Leningradsky Agrochemical Service Center,
Podbelsky Highway 9, 196608, Saint Petersburg, Russian Federation,
***e-mail: vova.goryk1978@mail.ru.*

Received 26.06.2025, Revised 21.10.2025, Accepted 29.04.2026

Abstract: The assessment of soil contamination with mobile forms of Cd and Pb in agricultural lands is due to the need to introduce regional standards based on the principles of the limiting baseline (ULBL). The dependence of their content on the particle size distribution of soils is shown (1113 observations). The use of cluster analysis made it possible to establish the limits of background content of mobile Pb for loams (less than 5.53 ± 0.08 mg/kg). Clusters contaminated with mobile Pb have significantly higher contents of organic carbon (%), mobile phosphorus and potassium, pH_{KCl} . The threshold content of mobile lead (ULBL) is 11.5 mg/kg. It is higher than the maximum allowable concentration (6 mg/kg) and reflects the permissible anthropogenic impact. Exceeding the Pb threshold was noted on 6% of soils in the studied area. They are located across the northern, central, and southern regions of the Leningrad Region. The background value of available Cd is less than 0.05 and no more than 0.08, and the maximum threshold value for available Cd is 0.16 mg/kg (ULBL). Cd-contaminated soils exceeding the ULBL are distributed from north to south relative to the regional center and cover 6.2% of the total area. An increase in generalized land quality indicators, such as the cultivation index and the complex agrochemical indicator, is demonstrated with a transition from background values of Pb and Cd beyond the ULBL. In the case of fallow lands, an increase in the spread of Pb values and a significant increase in Cd relative to arable lands was observed.

Keywords: mobile lead; mobile cadmium; soil pollution; threshold value; background content; Leningrad region.

ВВЕДЕНИЕ

Сельскохозяйственные земли нуждаются в рациональном подходе при эксплуатации (Захарченко, Пасько, 2019), так как они определяют экологическую и продовольственную безопасность региона (Threshold and guideline..., 2007). Пахотные земли вокруг

крупных промышленных агломераций подвержены наибольшему риску загрязнения тяжелыми металлами (далее ТМ) по сравнению с удаленными от них землями (Jarva, 2016). Экологическое законодательство Финляндии, которая граничит на севере с Ленинградской областью и обладает с ней сходными природно-климатическими условиями, признает важным экологический контроль сельскохозяйственных земель, территорий детских садов, где содержание загрязняющих веществ должно быть близким к естественному фону (Threshold and guideline..., 2007). Фоновая концентрация химического элемента, соответствующая естественному содержанию без антропогенного воздействия, плюс антропогенное воздействие до пороговых значений baseline (upper limit of baseline – ULBL), можно принять как безопасное (Jarva, 2016; Семенов, Королева, 2019; Плеханова, Золотарева, 2020; Яковлев, 2022).

Подвижные Pb и Cd в большей степени отражают загрязнение почв, чем валовые, так как они легкорастворимы и могут попадать в сельскохозяйственную продукцию. Их валовое содержание имеет устоявшиеся по времени использования экологических нормативов ПДК, чего нельзя сказать о подвижных формах. Для подвижного Pb ПДК/ОДК содержания в почвах составляет 6 мг/кг (Ориентировочно допустимые концентрации, 2009; Водяницкий, 2011), а для подвижного Cd норматив отсутствует (ГН 2.1.7.2041–06...). Следовательно, как точку отсчета загрязнения почв необходимо использовать фоновые значения. Естественное содержание ТМ в почвах включает антропогенное загрязнение, а также естественные аномалии, например, содержание мышьяка в почвах Финляндии (Threshold and guideline..., 2007; Jarva, 2016; Плеханова, Золотарева, 2020). В геохимии такой фон называли Baseline (Jarva, 2016). Он допускает поступление загрязняющих веществ и превышение естественного фона до некоторых пределов по содержанию микроэлементов (*Guideline value*), установленных Постановлением Правительства Финляндии 214/2007 (Threshold and guideline..., 2007). Пределы регионального Baseline полезны при оценке промышленного загрязнения почв (Mimba et al., 2018; Li et al., 2019). В экологическом почвоведении обосновывается возможность принять за норму природно-антропогенный фон (ПАФ)

(Яковлев, 2022). Из этого вытекает необходимость пересмотра региональных нормативов, согласно постановлению Правительства РФ от 13 февраля 2019 г. № 149 (О разработке, установлении и пересмотре нормативов, 2019).

Целью работы является агрохимическая характеристика почв с оценкой содержания подвижных Pb и Cd для контроля экологической безопасности сельскохозяйственных земель.

Выявление загрязненных ТМ земель являлось сопутствующей целью агрохимического исследования, поэтому исключается субъективный фактор, а также сокрытие неудобных фактов загрязнения ими сельскохозяйственных земель Ленинградской области.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Ленинградская область расположена на северо-западе европейской части России, вдоль берега Финского залива. Растительность относится к подзонам средней (на севере области) и южной тайги. В структуре почвенного покрова выделены шесть основных типов почв: подзолистый, болотно-подзолистый, дерново-глеевый, торфяно-болотный, дерново-карбонатный, дерново-аллювиальный.

Центр агрохимической службы “Ленинградский” провел агрохимический анализ почв 224 полей девяти районов (Волосовский, Волховский, Гатчинский, Кингисеппский, Ломоносовский, Лужский, Приозерский, Тихвинский и Тосненский) в соответствии с общепринятыми рекомендациями (Методические указания..., 2003). Картографической основой служили копии землеустроительных планов масштаба 1 : 10 000. При отборе проб почв использован GPS-навигатор Garmin GPSMAP 78s. Результаты обработаны при помощи программного обеспечения BaseCamp. Отбор объединенных почвенных проб произведен по элементарным участкам тростевым буром на глубину гумусового (пахотного) горизонта. Каждая объединенная проба составлена из 40 точечных проб и имеет массу не менее 400 г. Общее число проб – 1113 шт.

В каждой точке наблюдения учтены: площадь и вид угодий, характер растительности, гранулометрический состав и тип почвы. Кислотность солевой вытяжки pH (KC1), гидролитическая

кислотность и сумма обменных катионов определены по ГОСТ 26583-85, содержание подвижных P_2O_5 и K_2O – по методу Кирсанова в модификации ЦИНАО (ГОСТ 54650 2011), органического вещества – по методу Тюрина в модификации ЦИНАО (ГОСТ 23740-2016); подвижных ТМ – по РД 52.18.289 (РД 52.18.289).

$$\text{Иотн} = \frac{X_{\text{фак}} - X_{\text{мин}}}{X_{\text{опт}} - X_{\text{мин}}}, \quad (1)$$

где $X_{\text{опт}}$ – относительное значение показателя, $X_{\text{фак}}$ – наблюдаемое значение показателя, $X_{\text{мин}}$ – минимальное значение. При превышении оптимального значения текущим, отношение приравнено единице.

В расчетах использованы следующие минимальные значения агрохимических показателей: $pH_{\text{КС1}}$ – 3.5; содержание P_2O_5 и K_2O – 20 мг/кг почвы и 100 мг/кг (для торфяно-болотных почв); содержание гумуса – 0.5%. При превышении значением фактического показателя значения оптимального, относительный индекс приравнен 1.0. После нормирования (1) по всем показателям рассчитан индекс окультуренности ($I_{\text{окульт}}$) (Кулаковская, 1990):

$$\text{Индекс окульт} = \frac{I_{pH} + I_{p2O5} + I_{K2O} + I_{\text{гум}}}{4}, \quad (2)$$

где I_{pH} – относительный индекс pH, I_{p2O5} – индекс содержания подвижного фосфора, I_{K2O} – индекс содержания подвижного калия, $I_{\text{гум}}$ – индекс содержания органического вещества.

Расчет комплексного агрохимического показателя (КАП) осуществлен поэтапно по формулам (3–6) (Кулаковская, 1990):

$$B_i = \frac{X_{\text{фак}} - X_{\text{мин}}}{X_{\text{макс}} - X_{\text{мин}}}, \quad (3)$$

где B_i – значения показателя, нормированные на мини-макс, $X_{\text{фак}}$ – наблюдаемое значение, $X_{\text{мин}}$ – минимальное, $X_{\text{макс}}$ – максимальное. Далее рассчитан обобщенный показатель (ОП) как средняя величина B_i (3):

$$\text{ОП} = \frac{\sum B_i}{n}, \quad (4)$$

где ОП – обобщенный показатель, $\sum B_i$ – сумма используемых показателей B_i , n – количество показателей.

По разнице значений, полученных по формулам (3) и (4),

рассчитан коэффициент оптимальности (Копт) (Кулаковская, 1990):

$$\text{Копт} = 1 - \frac{ABS(\sum(\text{ОП}_i - B_i))}{n\text{ОП}}, \quad (5)$$

где $ABS(\sum(\text{ОП}_i - B_i))$ – сумма отклонений значений ОП от B_i по абсолютной величине (5), деленное на сумму ОП_i , по формуле (6) вычислено значение КАП:

$$\text{КАП} = \text{ОП} * \text{Копт}. \quad (6)$$

Статистический анализ выборки и корреляционный анализ проведены с использованием программ Microsoft Excel и Statistica 12, Qgis и MapInfo 15.2. Для выявления фонового содержания ТМ использованы стандартизация и кластеризация, применяемые в иерархическом кластерном анализе (Orange 3.29.3), Евклидово расстояние и метод Ward (Захарченко и др., 2023; Захарченко, 2024). Далее для каждого кластера рассчитано среднее значение агрохимических показателей.

Значение порогового содержания (upper limit of baseline – ULBL) микроэлемента x определялось по формуле (Jarva, 2016):

$$ULBL_x = P_{75} + 1,5(P_{75} - P_{25}). \quad (7)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проблема определения фонового содержания ТМ вызвана использованием их подвижных форм и выделением с помощью ацетатно-аммонийного буфера, что позволяет ускорять химико-аналитические работы, и тем самым охватывать большие территории при обследовании сельскохозяйственных земель. Для оценки загрязнения почв подвижным Pb используют ПДК = 6 мг/кг, а ПДК/ОДК подвижного кадмия (Cd) отсутствует (ГН 2.1.7.2041–06). Решением проблемы может стать установление региональной пороговой нормы содержания вещества. Разница между фоновым и пороговым значениями отразит антропогенное загрязнение выбросами веществ. Этот способ является наиболее продуктивным для выделения фоновых и загрязненных кластеров (Семенов, Королева, 2019). Предварительно следует отсеять внешние факторы, способные исказить результаты. Известно, что ПДК почв в отно-

шении валового содержания Pb и Cd разделяют по гранулометрическому составу и pH_{KCl} . Можно предположить, что для подвижных форм также выполняется эта зависимость (рис. 1).

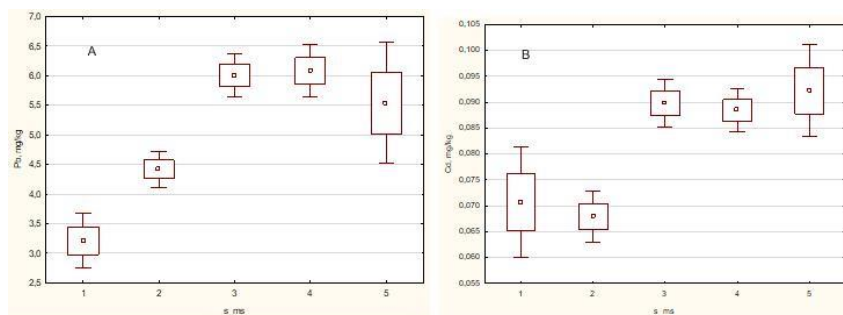


Рис. 1. Результаты дисперсионного анализа содержания Pb (A) и Cd (B) от гранулометрического состава почв: 1 – песчаные, 2 – супесчаные, 3 – легкий суглинок, 4 – средний суглинок, 5 – тяжелый суглинок, 6 – торфяник.

Fig. 1. Results of the dispersion analysis of Pb (A) and Cd (B) content from the granulometric composition of soils: 1 – sandy, 2 – sandy loam, 3 – light loam, 4 – medium loam, 5 – heavy loam, 6 – peat.

Видно, что “ящики с усами” 1 и 2 (песчаные и супесчаные почвы) не соприкасаются, значит, они достоверно отделяются от суглинистых (3–5) по содержанию Pb и Cd, что следует учитывать при кластеризации исходных данных. Все значения песчаных и супесчаных почв ниже ПДК подвижного Pb. Средние значения для легкого и среднего суглинка равны ПДК. Для тяжелого суглинка средние значения ниже ПДК, но попадают в доверительный интервал. Торфяники выделяются средним значением $>$ ПДК и сопровождаются существенным разбросом значений, и охватывают как загрязненные подвижным Pb участки, так и “чистые” от него участки. Из этого следует, что перед использованием кластерного анализа следует исключить исходные данные, относящиеся к пескам, супесям и торфяникам. Используемые в анализе суглинки по содержанию Pb разделились на пять кластеров, послед-

ний из которых (C5) имеет значения ниже ПДК, но на верхнем пределе доверительного интервала захватывает его (табл. 1).

Выделяются два кластера с чрезвычайно высоким (C1) и высоким (C2) уровнями загрязнения сельскохозяйственных земель подвижным свинцом ($C1 = 26 \pm 2.5$ и $C2 = 17 \pm 0.8$). Их общая площадь составляет 1 367.7 га или 3.5% от площади суглинистых почв. Эти почвы достоверно отличаются по благоприятным агрохимическим показателям от показателей кластеров C3–C5. Органическое вещество загрязненных земель меняется в пределах 6–6.6%, pH_{KCl} – 6.1–6.3, P_2O_5 – 411–433 мг/кг, K_2O – 183–194 мг/кг. Кластер C4 объединяет участки с фоновым содержанием подвижного свинца – 3 ± 0.08 мг/кг площадью 12 373 га (31.4% от общей площади). Аналогичный результат для фоновых наблюдений составляет (0.165–2.733 мг/кг), он получен в схожих условиях (Кулаковская, 1990). Расчет верхнего предела базовой линии (7) содержания подвижного свинца составляет:

$$ULBL_{Pb} = 6.7 + 1.5 \times (6.7 - 3.5) = 11.5 \text{ мг/кг.}$$

Кластеры, в которых содержание Pb выше $ULBL_{Pb}$, имеют достоверно ($p < 0.05$) высокие агрохимические показатели содержания P_2O_5 , K_2O и органического вещества (гумус). Выше $ULBL_{Pb}$ (2 766 га пашни или 6%) почвы представляются как опасные для сельскохозяйственного использования. Кластеры C4–C5 можно отнести к относительно чистой базовой линии по содержанию подвижного свинца, C3 – требует дополнительных исследований и контроля за содержанием Pb в продукции.

В Постановлении (214/2007) (Threshold and guideline..., 2007) используются показатели валового содержания свинца в почвах, которые существенно выше подвижных форм. Фоновое валовое содержание находится в пределах 0.1–5 мг/кг, что соответствует пределам кластеров C4 и C5. Пороговое значение существенно выше (60 мг/кг) того, что следует из законодательства РФ (ГОСТ 23740-2016, 2013) (32 мг/кг для супесей и 65 мг/кг – для суглинков при $pH_{KCl} < 5.5$, при $pH > 5.5$ ПДК = 130 мг/кг).

Таблица 1. Агрохимические характеристики кластеров содержания подвижного свинца (ПДК = 6 мг/кг) в суглинистых почвах

Table 1. Agrochemical characteristics of mobile lead clusters (MPC = 6 mg/kg) in loamy soils

Кластер	N (шт.)	Площадь		Содержание				
		га	%	органичес- кого вещества, %	pH _{KCl} , ед.	P ₂ O ₅ , мг/кг	K ₂ O, мг/кг	Pb, мг/кг
C1	8	330.0	0.84	6.6±1.2	6.3±0.6	433±144	183±8	26.34±2.5
C2	25	1037.7	2.64	6.0±0.6	6.1±0.2	411±68	194±3	16.98±0.8
C3	145	6517.6	16.57	5.1±0.3	5.7±0.1	306±26	144±1	8.97±0.27
C4	339	12372.7	31.45	4.7±0.2	5.8±0.1	229±15	118±9	3.09±0.08
C5	410	19081.1	48.50	4.8±0.2	5.7±0.07	237±15	113±6	5.53±0.08

Следует иметь в виду, что данное Постановление (Threshold and guideline..., 2007) касается селитебных и промышленных территорий. Нижний предел ULBL равен 200 мг/кг, он характеризует риск для здоровья человека, а верхний (750 мг/кг) – экологические проблемы и необходимость рекультивации земель.

Поля, загрязненные подвижным свинцом, расположены в Ленинградской области с севера на юг (рис. 2А).

На севере выявлены два поля дерново-подзолистых почв с высоким уровнем загрязнения (рис. 2А). В районе пос. Глобицы обнаружено восемь полей (рис. 2В). Подзолистые, серые почвы и карболитоземы наиболее распространены в районе Красного Села (рис. 2С). Высокий уровень загрязнения характерен для точек 22 и 43, меньший, но опасный уровень загрязнения отмечается для точек 13–15 и 20. На юге выявлено три точки дерново-подзолистых почв с очень высоким уровнем загрязнения подвижным Pb. Особенно высок уровень загрязнения Pb в подзолистых почвах в точках 676 и 1206.

В отличие от подвижного свинца, ПДК для кадмия не определена, но для оценки загрязненности почв можно с помощью иерархического кластерного анализа выделить фоновые значения (табл. 2).

Медианное значение 0.08 мг/кг совпадает со средним значением подвижного кадмия в кластере С2. Соответственно, участки кластера С1 можно классифицировать как фоновые ($M = 0.052 \pm 0.001$), участки С1 и С2, отнесенные к базовой линии, – как неопасные. Кластер С3 отражает высокий уровень антропогенного воздействия на почву, что требует повышенного внимания к качеству сельскохозяйственной продукции. Нижний квартиль базовой линии (P_{25}) содержания Cd равен 0.06; предельное значение базовой линии (7) (Jarva, 2016; Плеханова, Золотарева, 2020):

$$ULBL_{Cd} = 0.01 + 1.5 \times (0.1 - 0.06) = 0.16 \text{ мг/кг.}$$

Площадь земель с загрязнением почв выше этого значения составляет 2866 га (6.2% от площади). Значения С4 и С5 больше $ULBL_{Cd}$. Следовательно, все эти участки необходимо признать загрязненными Cd и нуждающимися в экотоксикологическом обследовании почв и сельскохозяйственной продукции.

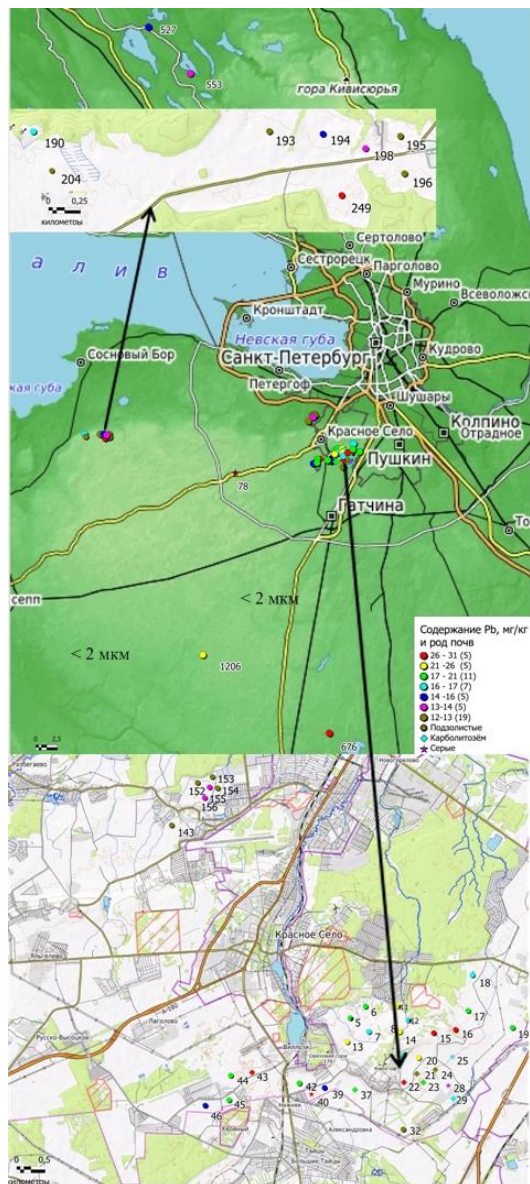


Рис. 2. Картограмма сельскохозяйственных полей, подверженных загрязнению подвижным свинцом. Цветом показан диапазон содержания подвижного Рb. Форма знаков отражает почвы по классификации 2004 г. Общее расположение точек наблюдения – А, район пос. Габицы – В, район Красное Село – С.

Fig. 2. Cartography of agricultural fields exposed to mobile lead contamination. The color shows the range of mobile Pb content. The shape of the signs reflects the soils according to the 2004 classification. The general location of the observation points – А, the area of the Gabitsy village – В, Krasnoe Selo – С.

Таблица 2. Агрохимические характеристики кластеров содержания подвижного кадмия в суглинистых почвах
Table 2. Agrochemical characteristics of mobile cadmium clusters in loamy soils

Кластер	N (шт.)	Площадь		Содержание				
		га	%	органического вещества, %	pH _{KCl} , ед.	P ₂ O ₅ , мг/кг	K ₂ O, мг/кг	Cd, мг/кг
C1	307	9947.7	25.29	4.1±0.1	5.6±0.09	248±17	106±7	0.050±0.001
C2	352	15837.7	40.26	4.7±0.2	5.7±0.08	246±16	127±7	0.080±0.001
C3	196	10161.3	25.83	5.5±0.3	5.8±0.11	255±23	138±1	0.11±0.001
C4	4	126.3	0.32	7.7±6.5	5.5±0.47	102±109	64±89	0.38±0.04
C5	68	3266.1	8.30	6.7±0.6	5.9±0.18	287±41	133±18	0.17±0.01

Максимальный уровень среднего содержания Cd в кластере С4 равен 0.38 ± 0.04 мг/кг. Следует отметить, что содержание органического вещества (гумуса) достоверно ($p < 0.05$) выше в кластерах с уровнем загрязнения ТМ более ULBL (С4, С5). По данным Постановления правительства Финляндии (214/2007) (Threshold and guideline..., 2007), фоновое значение валового Cd равно 0.03 мг/кг, и оно изменяется в пределах 0.01–0.15 мг/кг. Отмечается, что в почвах Европейского Севера фоновое содержание подвижного Cd находится в пределах 0.004–0.095; пороговое значение равно 1 мг/кг; нижнее нормативное значение валового содержания – 10, а верхнее – 20 мг/кг. Такие уровни загрязнения встречаются на селитебных и промышленных территориях и вызывают экологические риски деградации почв. ОДК валового Cd, используемое в России для песков и супесей, равно 0.5 мг/кг, для кислых суглинистых почв – 1.0 мг/кг, близких к нейтральным суглинкам – 2 мг/кг.

Географическое расположение точек, в которых обнаружено превышение содержания Cd относительно предела базовой линии во многом совпадает с распределением свинцового загрязнения (рис. 3).

Обозначилась точка с высоким загрязнением почв Cd на севере от Санкт-Петербурга, среди озер (рис. 3А); к востоку от него (пос. Сибола) также присутствуют точки загрязнения Cd (рис. 3В). Загрязненные земли наиболее часто встречаются вблизи Красного Села, в центральном и южном регионах Ленинградской области (дерново-подзолистые, редко серые почвы) и в районе Кингисеппа (почвы – глеевые). На юге области подвижным Cd загрязнены серые почвы и карболитоземы.

Показательно, что загрязнение подвижными Pb и Cd наблюдается на участках с высоким индексом окультуренности и высокими значениями комплексного агрохимического показателя (рис. 4).

Окультуренность считается “очень низкой” при значении ниже 0.40, “низкой” – в пределах 0.41–0.60 (как в нашем случае), “средней” – 0.61–0.80 и “высокой” – 0.81–1.00.

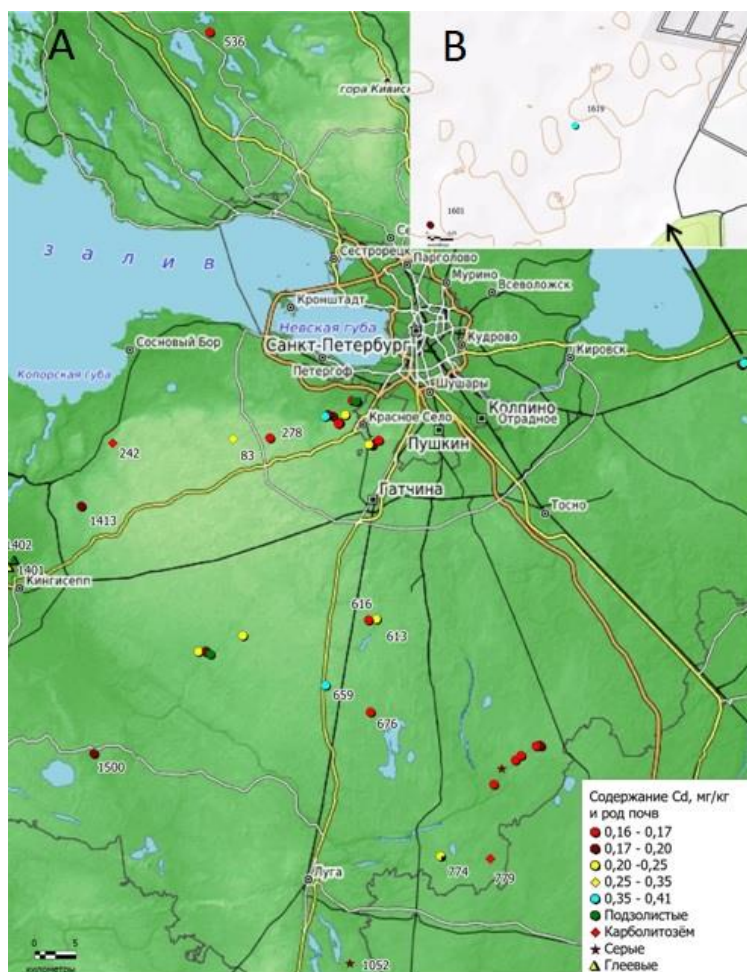


Рис. 3. Картограмма расположения сельскохозяйственных земель, загрязненных подвижным Cd. Цветом показан диапазон содержания. Форма знаков отражает род почв по классификации 2004 г. Общее расположение точек наблюдения – А, район пос. Сиболо – В.

Fig. 3. A cartographic diagram of the location of agricultural lands contaminated with mobile cadmium. The color shows the range of content. The shape of the signs reflects the soil type according to the 2004 classification. General location of observation points – А, area of the village Sibola – В.

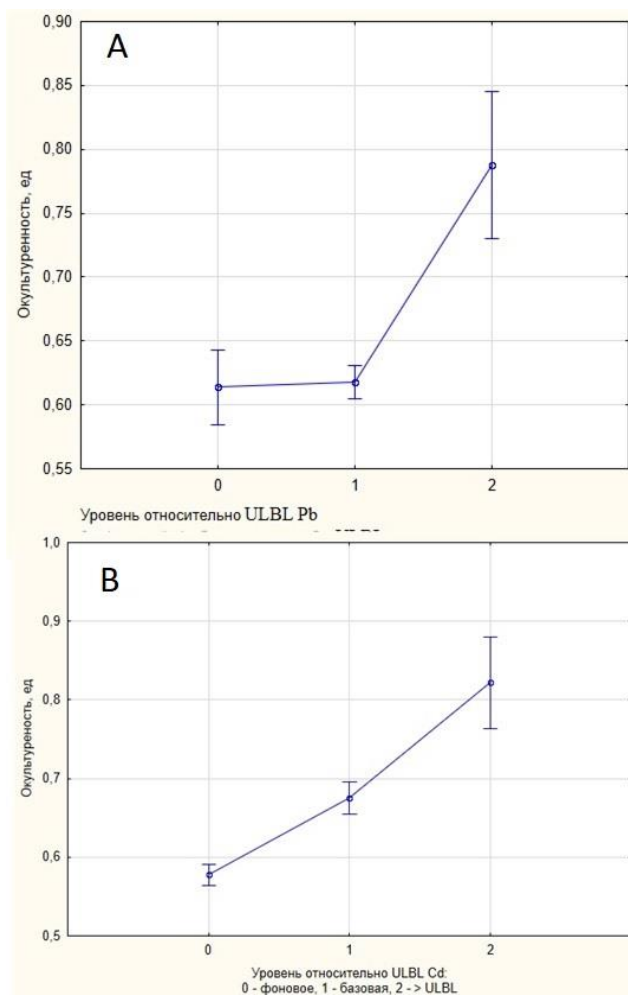


Рис. 4. Зависимость индекса окультуренности (ед.) от уровня загрязнения почв свинцом (A), кадмием (B) относительно ULBL: 0 – фоновый, 1 – базовая линия, 2 – $\geq$ ULBL.

Fig. 4. Dependence of the cultivation index (units) on the level of soil contamination with lead (A), cadmium (B) relative to ULBL: 0 – background, 1 – baseline, 2 – $\geq$ ULBL.

Низкая окультуренность наблюдается в случае фоновой и базовой уровней содержания подвижного Pb, причем достоверные различия (при $p > 0.95$) наблюдаются между 1-ым и 2-ым уровнем загрязнения (рис. 4А). В случае с Cd наблюдается линейное увеличение комплексного показателя, различия между уровнями загрязнения достоверны (рис. 4В). Предположительно, сам процесс окультуривания земель сопровождается внесением больших доз азотных, фосфатных и калийных удобрений, и с ними вместе в почву попадают ТМ (особенно Cd) (Бакаева, Еремейшвили, 2015; Комаров и др., 2019).

Для выделения базовой линии содержания ТМ (фоновые территории с незначительным антропогенным воздействием) следует удалить точки наблюдения, отражающие содержание подвижных ТМ выше ULBL (загрязненные). Тем самым определены территории в малой степени подверженные антропогенному воздействию (табл. 3). Агрохимические свойства таких точек наблюдения формируют образ модельной экологически безопасной почвы, который можно использовать для сравнительного анализа с почвами, подверженными интенсивному воздействию.

Комплексный агрохимический показатель (КАП) изменяется в пределах 0–100%, поэтому значение 0.33% отнесено к “низкому” (ГОСТ 23740-2016, 2013). Содержание органического вещества, равное $4.7 \pm 0.2\%$, относится к категории “среднее” (диапазон 4.1–6.0%). Максимальное значение – “очень высокое” ($> 10\%$). pH_{KCl} имеет оптимальное значение 5.8 ± 0.1 , учитывая, что почвы в большинстве относятся к кислым дерново-подзолистым. Минимальное значение – “очень кислое” – 3.7 (< 4.0), а максимальное значение – 7.6 – “щелочное”. Гидролитическая кислотность (Нг) равна 3.6 ± 0.3 ммоль(экв)/100г, является “слабокислой” (3.1–4.0) и в максимуме – “очень кислой” (> 6 ммоль(экв)/100 г.). Средняя сумма поглощенных оснований (ммоль /100 г) равна 16.0 ± 1.3 , она является “повышенной” (15.1–20.0), и в максимуме – “очень высокой” (> 30). Почвы базовой линии (Jarva, 2016) характеризуются очень высоким содержанием подвижного фосфора (253 ± 20 мг/кг) и относятся к градации “с высоким содержанием”.

Таблица 3. Статистические показатели агрохимических свойств базовой геохимической линии сельскохозяйственных земель (без торфяных почв) относительно содержания Pb и Cd

Table 3. Statistical indicators of agrochemical properties of the basic geochemical line of agricultural lands (without peat soils) relative to the content of Pb and Cd

Агрохимические показатели	N	Mean $\pm \Delta$	Median	P₂₅	P₇₅
Комплексный агрохимический показатель, %	980	33.5 $\pm$ 0.6	34.1	30.5	37.0
Органическое вещество, %	976	4.7 $\pm$ 0.2	4.4	3.7	5.2
pH KCl	980	5.8 $\pm$ 0.1	5.7	5.2	6.4
Hг, ммоль(экв)/100 г	475	3.6 $\pm$ 0.3	3.3	2,4	4.3
S, ммоль /100 г	517	16.0 $\pm$ 1.3	15.0	12.0	19.0
P ₂ O ₅ , мг/кг	980	253 $\pm$ 20	216	125	353
K ₂ O, мг/кг	980	122 $\pm$ 9	106	68	157
Pb, мг/кг	980	4.8 $\pm$ 0.2	4.5	3.4	6.0
Cd, мг/кг	980	0.079 $\pm$ 0.003	0.08	0.06	0.10

По среднему содержанию калия (122 ± 9 мг/кг) отмечена “очень высокая обеспеченность” ($120\text{--}180$ мг/кг), значение максимума расценивается как “загрязнение” (600 мг/кг). Среднее содержание ТМ можно отнести к фоновым значениям, не превышающим установленного предела ULBL. С практической точки зрения в таблице 3 отражены региональные агрохимические свойства, в пределах которых почвы считаются безопасными, а их превышение позволяет относить почвы к загрязненным.

По географическим координатам точек отбора проб проведен анализ космических снимков (Google Earth Pro). Большая часть участков на снимках имеет дешифровочные признаки пашни (полосы следов от сеялок и других ходовых агрегатов), однако на поверхности ряда участков заметны бугристая поверхность, кустарниковая и/или древесная растительность. Участки с признаками пашни (1) составляют 79.6% от площади, а вторые – целинные (2) – 20.4%. Представляют интерес изменения содержания ТМ (Pb и Cd) в случае снижения интенсивности использования земель (рис. 5).

По снижению индекса окультуренности и КАП выявлено, что на залежных землях (целина) снижена антропогенная нагрузка (рис. 5А и 5Б); при ее снятии (целина) среднее содержание свинца не увеличивается, но существенно возрастает размер доверительного интервала (рис. 5В). В одних случаях происходит рост содержания подвижного Pb, в других – снижение. Существует мнение, что загрязнения валовыми Pb и особенно Cd в большей степени определяются внесением калийных и фосфатных удобрений (Водяницкий, 2011; Зубков, Зубкова, 2012; Елсуков и др., 2022; Mauger et al., 2022), что согласуется с данными таблицы 1. Однако не все так однозначно. На целине, с одной стороны, наблюдается снижение окультуренности и КАП, с другой, – достоверное увеличение подвижного Cd в почве (рис. 5D). В залежных землях, возможно, присутствует внутрипочвенная миграция Cd к поверхности при отсутствии ежегодного перемешивания за счет отвальной вспашки.

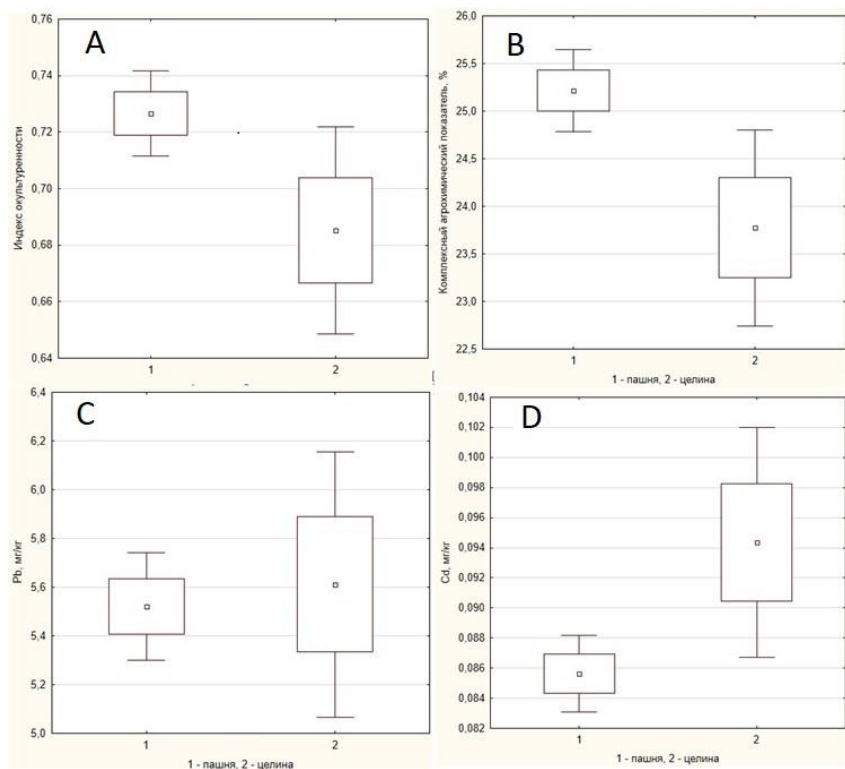


Рис. 5. Зависимость содержания Pb (А), Cd (В), индекса окультуренности (С) и комплексный агрохимический показатель (D) от использования сельскохозяйственных земель (1 – пашня, 2 – целина).

Fig. 5. Dependence of the content of Pb (A), Cd (B), the index of cultivation (C) and the complex agrochemical indicator (D) on the use of agricultural land (1 – arable land, 2 – virgin land).

После снижения антропогенной нагрузки происходят: достоверный рост органического вещества на 0.6%, снижение солевого pH на 0.1 ед. и увеличение суммы поглощенных оснований на 1.8 ммоль /100 г. На целинных почвах достоверно снижается содержание P_2O_5 (на 88 мг/кг) и K_2O (на 16.2 мг/кг). Подкисление почв усиливает подвижность Cd в почве и его поступление в куль-

турные растения (Зубков, Зубкова, 2012). Можно предположить, что при снятии антропогенной нагрузки на пахотные почвы происходит увеличение содержания гумуса, снижение pH_{KCl} за счет пролонгированного использования накопленных минеральных удобрений. При отсутствии вспашки и перемешивания слоев возможно накопление Cd за счет осаждения из загрязненных воздушных масс.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Подвижные Pb и Cd аналогично валовым имеют меньшие значения в песчаных и супесчаных почвах и достоверно большие – в суглинистых.

2. С помощью иерархического кластерного анализа выделены пределы фоновое содержания подвижного Pb для суглинистых почв сельскохозяйственных полей ($< 5.53 \pm 0.08$) и обусловлены естественными процессами.

3. Содержание тяжелых металлов выше фона, вызванные антропогенными выбросами, внесенными удобрениями допускается в виде базовой линии до некоторого предела, выше которого почвы считаются загрязненными. Предельное пороговое значение концентрации ($ULBL_{Pb}$) подвижного Pb в суглинках равно 11.5 мг/кг. Площадь земель, превышающих эту величину, равняется 6% от общей площади. Кластеры, загрязненные подвижным Pb, имеют достоверно более высокое содержание органического углерода (%), подвижного фосфора и калия, pH_{KCl} .

4. Географическое распределение сельскохозяйственных полей с загрязнением подвижным Pb присутствует как в северных, так центральных и южных регионах Ленинградской области. Наиболее часто встречаются загрязненные поля в районе Красного Села.

5. Кластеры фоновое значения содержания Cd составляют менее 0.050 до 0.080 мг/кг, предельное пороговое значение концентрации подвижного Cd равно 0.16 мг/кг. Почвы, превышающие этот порог, занимают 6.2% от общей обследованной площади. Кластеры, загрязненные подвижным Cd, имеют достоверно более высокое содержание органического углерода (%). Географически загрязненные земли распространены с севера на юг относительно

Санкт-Петербурга. Наиболее высокое загрязнение отмечается на юго-западе от него.

6. Показано увеличение обобщенных показателей качества земель, индекса окультуренности и комплексного агрохимического показателя с переходом содержания Pb и Cd от фоновых за пределы ULBL.

7. Традиционные агрохимические показатели характеризуют базовую линию почв ниже порога загрязнения тяжелыми металлами: КАП = 33.5%; окультуренность – 0.54; органическое вещество – 4.7%; pH_{KCl} – 5.8; гидролитическая кислотность – 3.6 ммоль(экв)/100 г; сумма обменных оснований – 16 ммоль/100 г; подвижный P_2O_5 – 253 мг/кг; подвижный K_2O – 122 мг/кг; Pb – 4.8 мг/кг; Cd – 0.08 мг/кг.

8. В случае залежных земель или при их исключении из пашни наблюдается достоверное снижение индекса окультуренности и КАП. На залежных землях показано увеличение разброса значений по Pb, установлено на них достоверное увеличение содержания Cd относительно пашни.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бакаева Е.А., Еремейшвили А.В. Некоторые особенности содержания микроэлементов в почвенном и снежном покрове европейского севера России // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 3. С. 547–554.
2. Водяницкий Ю.Н. Об опасных тяжелых металлах/металлоидах в почвах // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2011. Вып. 68. С. 57–82.
3. ГОСТ 26583-85. Почвы. Определение pH солевой вытяжки, обменной кислотности, обменных катионов, содержания нитратов, обменного аммония и подвижной серы методами ЦИНАО. М.: Гос. комитет СССР по стандартам. 1985.
4. ГОСТ 54650 2011. Почвы. Определение подвижных соединений фосфора и калия по методу Кирсанова в модификации ЦИНАО. М.: Стандартиформ. 2013.
5. ГОСТ 23740-2016. Грунты. Методы определения содержания органических веществ. М.: Стандартиформ. 2013.
6. ГН 2.1.7.2041–06. Гигиенические нормативы. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве: Гигиенические

нормативы. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2006.

7. Елсуков Е.Ю., Недбае И.С., Кузьмина Д.С. Загрязнение почв в зоне воздействия производства фосфорных удобрений // Вестник СПбГУ. Науки о Земле. 2022. Т. 67. Вып. 4. С. 652–674. DOI: <https://doi.org/10.21638/spbu07.2022.406>.

8. Захарченко А.В., Пасько О.А. Растения, почвы и экологически устойчивое земледелие. СПб.: ООО Национальный информационный канал, 2022. 179 с.

9. Захарченко А.В., Тигеев А.А., Пасько О.А., Московченко Д.В. Кластерный анализ стандартизованных значений содержания микроэлементов твердой фазы снега городов Тобольск и Тюмень // Экология и промышленность России. 2023. Т. 27. № 4. С. 61–65. DOI: <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2023-4-61-65>.

10. Захарченко А.В. Обоснование методов стандартизации данных для кластеризации микроэлементного состава пыли снегового покрова городских земель // Реалии, тренды и инновации в современном обществе. СПб: Материалы XXI Международной научно-практической конференции. СПб., 2024. С. 171–178.

11. Зубков Н.В., Зубкова В.М. Азотные удобрения и динамика кадмия в системе “почва-растение” // Вестник Московского городского педагогического университета. Серия: “Естественные науки”. 2012. № 1 (9). С. 52–61.

12. Комаров В.И., Селиванов О.Г., Марцев А.А., Подолец А.А., Лукьянов С.Н. Содержание тяжелых металлов в пахотном горизонте почв сельскохозяйственного назначения Владимирской области // Агрохимия. 2019. № 12. С. 75–82. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0002188119100089>.

13. Кулаковская Т.Н. Оптимизация агрохимической системы почвенного питания растений. М.: Агропромиздат, 1990. 218 с.

14. Методические указания по проведению комплексного мониторинга плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения / под ред. Державина Л.М., Булгакова Д.С. М.: ФГНУ “Росинформагротех”, 2003. 240 с.

15. О разработке, установлении и пересмотре нормативов качества окружающей среды для химических и физических показателей состояния окружающей среды, а также об утверждении нормативных документов в области охраны окружающей среды, устанавливающих технологические показатели наилучших доступных технологий: Постановление Правительства РФ от 13 февраля 2019 г. № 149. URL: <https://www.publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201902190012000>.

16. Ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) химических веществ в почве: Гигиенические нормативы. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. 10 с.
17. Плеханова И.О., Золотарева О.А. Экологическое нормирование состояния почв, загрязненных тяжелыми металлами // Агрохимия. 2020. № 10. С. 79–88. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002188120100099>.
18. РД 52.18.289. Методика выполнения измерений массовой доли подвижных форм металлов (меди, свинца, цинка, никеля, кадмия, кобальта, хрома, марганца) в пробах почвы атомно-абсорбционным анализом ОКСТУ 0017. М.: Гос. комитет СССР по Гидрометеорологии. 1990. 36 с.
19. Семенков И.Н., Королева Т.В. Международные системы нормирования содержания химических элементов в почвах: принципы и методы (обзор) // Почвоведение. 2019. № 10. С. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0032180X19100101>.
20. Яковлев А.С. Вопросы экологического нормирования и установления фоновых значений свойств почв природных и природно-антропогенных объектов // Почвоведение. 2022. № 2. С. 252–260. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0032180X22020149>.
21. Jarva J. Geochemical baselines in the assessment of soil contamination in Finland. Espoo: Geological Survey of Finland, 2016. 52 p.
22. Li Z., Deblon Judith Yanqun Zu, Gilles Colinet, Bo Li and Yongmei He. Geochemical Baseline Values Determination and Evaluation of Heavy Metal Contamination in Soils of Lanping Mining Valley (Yunnan Province, China) // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2019, Vol. 16. No.16. 4686; P. 1–18. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph16234686>.
23. Mayer M.M., Basta N.T., Schekel K.G. Using phosphate amendments to reduce bioaccessible Pb in contaminated soils: A meta-analysis // Front Soil Sci. 2022. Vol. 7. No. (2) P. 1–14. DOI: <https://doi.org/10.3389/fsoil.2022.1028328>.
24. Mimba M.E., Ohba T., Nguemhe Fils, S.C. et al. Regional geochemical baseline concentration of potentially toxic trace metals in the mineralized Lom Basin, East Cameroon: a tool for contamination assessment // Geochem Trans. 2018. Vol.19. No.11. P. 1–17. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12932-018-0056-5>.
25. Threshold and guideline values for harmful substances in soil. Government Decree on the Assessment of Soil Contamination and Remediation Needs (214/2007). Finland: Legally binding texts are those in Finnish and Swedish Ministry of the Environment, 2007. 6 p.

REFERENCES

1. Bakayeva E.A., Yeremeishvili A.V., Some features of content of trace elements in soils and snow of northern European in Russia, *Modern problems of science and education*, 2015, No. 3, pp. 547–554. (In Russ.)
2. Vodianitsky Y.N., On dangerous heavy metals/metalloids in soil, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2011, No. 68, pp. 56–82, DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2011-68-56-82>. (In Russ.)
3. GOST 26583-85, Soils. Determination of salt extract pH, exchangeable acidity, exchangeable cations, nitrate content, exchangeable ammonium and mobile sulfur by TsINAO methods, Moscow: USSR State Committee on Standards, 1985. (In Russ.)
4. GOST 54650-2011, Soils. Determination of mobile phosphorus and potassium compounds by the Kirsanov method modified by TsINAO, Moscow: Standartinform Publ, 2013. (In Russ.)
5. GOST 23740-2016, Soils. Methods for determining the content of organic substances, Moscow: Standartinform Publ, 2013. (In Russ.)
6. GN 2.1.7.2041–06. Hygienic standards. Maximum permissible concentrations (MPC) of chemicals in the soil: Hygienic standards, Moscow: Federal Center of Hygiene and Epidemiology of Rospotrebnadzor, 2006. (In Russ.)
7. Elsukov E.Y., Nedbaev I.S., Kuzmina D.S., Monitoring of soil pollution in the area affected by the production of phosphorus fertilizers), *Bulletin of St. Petersburg State University. Earth Sciences*, 2022, Vol. 67, No. 4, pp. 652–674, DOI: <https://doi.org/10.21638/spbu07.2022.406>. (In Russ.)
8. Zakharchenko A.V., Pas'ko O.A., *Plants, soils, and sustainable agriculture*, St. Petersburg: National Information Channel LLC Publ, 2022, 179 p. (In Russ.)
9. Zakharchenko A.V., Tigeev A.A., Pasko O.A., Mochkovchenko D.V., On the background values of the geochemical spectra of microelements of the solid phase of snow during their comparative analysis in the cities of Tobolsk and Tyumen, *Ecology and industry of Russia*, 2023, Vol. 27, No. 4, pp. 61–65, DOI: <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2023-4-61-65>. (In Russ.)
10. Zakharchenko A.V., Substantiation of data standardization methods for clustering the trace element composition of dust and snow cover of urban lands, *Realities, trends and innovations in modern society*, Proc. of the 21th Sci. Conf, Saint Petersburg, 2024, pp. 171–178. (In Russ.)
11. Zubkov N.V., Zubkova V.M., Nitrogen Fertilizers and Cadmium Dynamics in the “Soil-Plant” System, *The Academic Journal of Moscow City University, series “Natural Sciences”*, 2012, Vol. 9, No. 1, pp. 52–61. (In Russ.)

12. Komarov V.I., Selivanov O.G., Martsev A.A., Podoletc A.A., Lukyanov S.N., Heavy metals content in agricultural soils of Vladimir region, Russia, *Agricultural Chemistry*, 2019, No. 12, pp. 75–82, DOI: <https://doi.org/10.1134/S0002188119100089>. (In Russ.)
13. Kulakovskaya T.N., *Optimization of agrochemical system of soil nutrition of plants*, Moscow: Agropromizdat Publ, 1990, 218 p. (In Russ.)
14. Guidelines for conducting comprehensive monitoring of soil fertility on agricultural lands), Ed. L.M. Derzhavina, D.S. Bulgakov, Moscow: FGNU “Rosinformagrotekh”, 2003, 240 p. (In Russ.)
15. On the development, establishment and revision of environmental quality standards for chemical and physical indicators of the environment, as well as on the approval of regulatory documents in the field of environmental protection that establish technological indicators of the best available technologies: Decree of the Government of the Russian Federation dated February 13, 2019 No. 149, URL: <https://www.publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201902190012000>. (In Russ.)
16. Approximate permissible concentrations (APC) of chemicals in the soil: Hygienic standards, Moscow: Federal Center for Hygiene and Epidemiology of Rospotrebnadzor, 2009, 10 p. (In Russ.)
17. Plekhanova I.O., Zolotareva O.A., Ecological regulation of the state of soils contaminated heavy metal, *Agricultural Chemistry*, 2020, No. 10, pp. 79–88, DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002188120100099>. (In Russ.)
18. RD 52.18.289 *Methods for measuring the mass fraction of mobile forms of metals (copper, lead, zinc, nickel, cadmium, cobalt, chromium, manganese) in soil samples by atomic absorption analysis* (USSR standard), Moscow: USSR State Committee for Hydrometeorology, 1990. 36 p. (In Russ.)
19. Semenov I.N., Koroleva T.V., International Environmental Legislation on the Content of Chemical Elements in Soils: Guidelines and Schemes, *Eurasian Soil Science*, 2019, No. 10, pp. 1–10, DOI: <https://doi.org/10.1134/S0032180X19100101>.
20. Yakovlev A.S., Issues of Environmental Regulation and Establishment of Background Values of Soil Properties of Natural and Natural Anthropogenic Objects, *Eurasian Soil Science*, 2022, No. 2, pp. 252–260, DOI: <https://doi.org/10.31857/S0032180X22020149>.
21. Jarva J., Geochemical baselines in the assessment of soil contamination in Finland, *Geological Survey of Finland*, 2016, 52 p.
22. Li Z., Deblon Judith Yanqun Zu, Gilles Colinet, Bo Li, Yongmei He, Geochemical baseline values determination and evaluation of heavy metal contamination in soils of Lanping Mining Valley (Yunnan Province, China),

International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, No. 16, 4686, pp. 1–18, DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph16234686>.

23. Mayer M.M., Basta N.T., Schekel K.G., Using phosphate amendments to reduce bioaccessible Pb in contaminated soils: A meta-analysis, *Front Soil Sci*, 2022, Vol. 72, No. 2, pp. 1–14, DOI: <https://doi.org/10.3389/fsoil.2022.1028328>.

24. Mimba M.E., Ohba T., Nguemhe Fils S.C. et al., Regional geochemical baseline concentration of potentially toxic trace metals in the mineralized Lom Basin, East Cameroon: a tool for contamination assessment, *Geochem Trans*, 2018, Vol. 19, No. 11, pp. 1–17, DOI: <https://doi.org/10.1186/s12932-018-0056-5>.

25. Threshold and guideline values for harmful substances in soil. Government Decree on the Assessment of Soil Contamination and Remediation Needs (214/2007), Legally binding texts are those in Finnish and Swedish Ministry of the Environment, Finland: 2007, 6 p.

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2026-128-174-193



Ссылки для цитирования:

Денисова Г.И., Карпова Д.В. Распределение фосфора в агрегатах разного размера в дерново-подзолистой почве склонового ландшафта // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2026. Вып. 128. С. 174-193. DOI: 10.19047/0136-1694-2026-128-174-193

Cite this article as:

Denisova G.I., Karpova D.V., Distribution of phosphorus in aggregates of different sizes in sod-podzolic soil of the slope landscape, Dokuchaev Soil Bulletin, 2026, V. 128, pp. 174-193, DOI: 10.19047/0136-1694-2026-128-174-193

Распределение фосфора в агрегатах разного размера в дерново-подзолистой почве склонового ландшафта

© 2026 г. Г. И. Денисова^{1*}, Д. В. Карпова^{2**}

¹Почвенно-экологический центр МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия, Московская обл., Солнечногорский р-н, д. Чашиново,

*<https://orcid.org/0009-0005-9841-9444>,
e-mail: galya-denisova787@yandex.ru.

²МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, 1,

**e-mail: karpovad@mail.ru.

Поступила в редакцию 17.03.2026, принята к публикации 29.04.2026

Резюме: Перераспределение фосфора в почвенном покрове представляет собой важную научную и практическую проблему. Рассматривать фосфор как “неподвижный” элемент почвы не вполне корректно, поскольку его соединения могут активно перераспределяться в ходе эрозионных процессов. Результаты проведенного исследования показали, что участки аккумуляции почвенных частиц не являются участками аккумуляции фосфора. В работе были изучены различные формы фосфора в дерново-подзолистой почве, приуроченной к разным элементам склона. Установлено, что подвижные, минеральные и валовые формы фосфора преимущественно накапливаются в верхней части склона. При продвижении вниз по склону их содержание достоверно

снижается, при этом статистически значимые различия между почвами нижней части склона и его подножия не выявлены ($p > 0.05$). Анализ водопрочных агрегатов позволил заключить, что основной причиной выноса фосфора является водный режим исследуемых позиций склона. В воздушно-сухих агрегатах разных размерных фракций содержание подвижного и валового фосфора существенно не различается. Агрономически ценные агрегаты (размером 2–5 мм в диаметре) преимущественно накапливают минеральный фосфор. Следовательно, они играют ключевую роль в аккумуляции минеральных малоподвижных соединений фосфора.

Ключевые слова: дерново-подзолистые почвы; углерод органических соединений; подвижный фосфор; минеральный фосфор; валовый фосфор.

Distribution of phosphorus in aggregates of different sizes in sod-podzolic soil of the slope landscape

© 2026 G. I. Denisova^{1*}, D. V. Karpova^{2**}

¹*Educational and Experimental Soil and Ecological Center,
Moscow State University,
Chashnikovo 141592, Moscow oblast, Russian Federation,
*<https://orcid.org/0009-0005-9841-9444>,
e-mail: galya-denisova787@yandex.ru.*

²*Lomonosov Moscow State University,
1 Leninskie Gori, Moscow 119991, Russian Federation,
**e-mail: karpovad@mail.ru.*

Received 17.03.2026, Accepted 29.04.2026

Abstract: Redistribution of phosphorous is very important problem. Naming phosphorous “immobile” soil element is inaccurate, because it easily washing away due to erosion proses. In our research we observed, that the point of soil particles accumulation are not points of phosphorous accumulation. We examined different forms of phosphorous in soil: mobile, mineral, organic and total. Mobile phosphorous, mineral phosphorous and total phosphorous mostly accumulated at the top of the slope. Down the slope, their content decreases considerably, without significant differences between the soil at the slope and at the foot of the slope (p -value < 0.05). Moreover, the examination of water-stable aggregates leads to the conclusion, that water-regime on the slope and in the bottom of the slope is the main reason of phosphorus removal. The air-dry different sized aggregates mostly contain approximately equal amounts of

mobile and total phosphorous. They are aggregates measuring 5–2 millimeters in diameter which predominantly accumulate mineral phosphorus, so agronomically valuable aggregates play the key role in mineral immobile phosphorous compounds accumulation.

Keywords: Albeluvisols; organic carbon; mobile phosphorous; mineral phosphorus; total phosphorous.

ВВЕДЕНИЕ

Фосфор является одним из ключевых макроэлементов в жизни растений. В отличие от азота и углерода, он не поступает в растения из атмосферы; его основным источником служит материнская порода, прежде всего содержащиеся в ней апатиты. В процессе выветривания фосфор может вовлекаться в биологический круговорот и переходить во фракцию органических фосфатов. В дальнейшем эти соединения трансформируются во вторичные минеральные формы, связанные с кальцием и полуторными оксидами, подвижность которых со временем снижается. Соотношение между органическими и минеральными формами фосфора в почве определяется направленностью почвообразовательного процесса (Иванов, 2012).

В среднем по России содержание валового фосфора в дерново-подзолистых почвах колеблется от 1050 мг/кг в легкосуглинистых и супесчаных разновидностях до 1170 мг/кг в суглинистых; при этом лишь немногим более четверти этого количества приходится на органические формы фосфора (Иванов, 2012). Основными формами миграции фосфора в почве являются органические фосфаты, а также фосфаты, ассоциированные с органическим веществом посредством кальциевых мостиков. По профилю почвы фосфор распределен неравномерно: в дерново-подзолистых почвах его содержание резко снижается в элювиальном горизонте (почти в 5–10 раз) по сравнению с гумусовым горизонтом; в черноземах оно коррелирует с содержанием органического вещества, а в агропочвах максимум фосфора в большинстве случаев приурочен к зонам внесения удобрений (Медведев и др., 2016).

Основная проблема применения фосфорных удобрений в сельском хозяйстве состоит в их сравнительно низкой эффективности: растениями используется лишь 25–35% внесенного фосфо-

ра (Иванов, 2012). Вследствие этого возрастает риск выноса фосфора с поверхностным стоком и в результате эрозионных процессов, что способствует загрязнению водоемов. Фосфор относится к загрязняющим веществам 3-го класса опасности (Приказ Минсельхоза России..., 2016). Его избыточное поступление в водные объекты может вызывать интенсивное развитие водорослей, помутнение воды, дефицит кислорода, снижение видового разнообразия и общую деградацию экосистем (Evans et al., 2020).

В почвах лесной зоны возврат фосфора с растительными остатками не превышает половины его потребления, тогда как для пашни эта величина может достигать 70%. В агроэкосистемах потери фосфора значительно возрастают вследствие поверхностного стока и водной эрозии (Иванов, 2012; Alewell et al., 2020). Поэтому, по оценкам, около 43% почв мира испытывают дефицит фосфора (Liu et al., 2012). При этом зоны аккумуляции смытого материала не всегда совпадают с зонами аккумуляции смытого фосфора, хотя содержание глинистых частиц положительно коррелирует с накоплением фосфора (Corbee, 2021). Для подвижного фосфора на склонах южных черноземов описана иная картина: в ложбинах его содержание у подножия возрастает, тогда как на выпуклых формах рельефа максимальные значения могут наблюдаться в средней части склона, а к подножию снижаться (Медведев и др., 2016). Для черноземов обыкновенных также показано, что перераспределение подвижного фосфора зависит от экспозиции склона: на южных склонах более высокие значения отмечаются на вершине, а на северных – в нижней части склона, в зоне частичной аккумуляции (Губарев и др., 2019).

В исследованиях зависимости между объемом поверхностного стока и потерями подвижного фосфора получены неоднозначные результаты. Одни авторы не выявили между ними отчетливой корреляции, хотя отмечали широкие колебания концентрации фосфора практически на всем протяжении периода стока. Другие исследователи, работавшие на склоновых участках, напротив, фиксировали сравнительно небольшую изменчивость концентраций, выраженную главным образом в начальный период стока (Han, 2010).

На содержание доступного фосфора в почве влияют также циклы промерзания–оттаивания. Прежде всего они изменяют динамику фосфора за счет разрыва связей с агрегатами, повышая доступность ассоциированных с ними соединений (Li et al., 2022). Циклы увлажнения–иссушения также воздействуют на фосфорный режим: в песчаных почвах показано, что после первого такого цикла количество фосфора, связанного с микробной биомассой, уменьшается примерно вдвое. Одновременное снижение сорбции фосфора может свидетельствовать о том, что высвобожденный микробный фосфор переходит в адсорбированное состояние, а извлекаемый водный фосфор косвенно увеличивается вследствие уменьшения сорбции. Однако при частом повторении циклов увлажнения–иссушения почва достаточно быстро адаптируется к таким условиям (Chen et al., 2021).

Циклы увлажнения–иссушения и промерзания–оттаивания влияют и на структуру почвы. Согласно современным данным, циклы промерзания и оттаивания отрицательно сказываются на распределении воздушно-сухих агрегатов (Huang et al., 2021; Li et al., 2022). При этом увеличивается содержание агрегатов диаметром < 0.25 и $1\text{--}2$ мм, особенно на склонах северо-западной экспозиции. Хотя содержание углерода в агрегатах разного размера может оставаться неизменным, его качественный состав существенно различается (Холодов, 2020). Имеются также работы, указывающие на зависимость содержания подвижного фосфора от размера агрегатов. Так, на затененном склоне наибольшее относительное содержание доступного фосфора наблюдалось в агрегатах < 0.25 и > 5 мм, а наименьшее – в агрегатах $2\text{--}5$ мм, тогда как на освещенном склоне содержание фосфора постепенно возрастало от мелких агрегатов к крупным. В большинстве случаев для агрегатов < 1 мм содержание фосфора увеличивалось с ростом их доли, тогда как для агрегатов размером > 1 мм чаще отмечалась обратная зависимость (Huang et al., 2021). Непосредственные исследования циклов промерзания–оттаивания также подтвердили увеличение подвижности фосфора, ассоциированного с агрегатами, после таких воздействий (Li et al., 2022).

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования служило пахотное поле на склоне, расположенное на территории Учебно-опытного почвенно-экологического центра МГУ имени М.В. Ломоносова “Чашниково” (Россия, Московская область, городской округ Солнечногорск). Климат района умеренно континентальный, с относительно холодной зимой и теплым летом. Сумма температур выше 10 °С составляет 1600–2200 °С, продолжительность вегетационного периода – 110–140 дней. Участок расположен в зоне избыточного увлажнения с промывным водным режимом. Среднегодовое количество осадков составляет примерно 540–600 мм, из которых около 2/3 выпадает в виде дождя, остальная часть – в виде снега. Растительность соответствует южнотаежной подзоне хвойно-широколиственных лесов (Шоба и др., 2019).

Исследуемый участок пашни характеризуется неоднородным рельефом со склонами северной и восточной экспозиции. Различие экспозиций и сложность микрорельефа обуславливают проведение пахоты вдоль склона. Подстилающие породы в Чашниково разнообразны: помимо широко распространенных покровных суглинков, выделяются участки морены и флювиогляциальных песков. В нижней части склона почвы относятся к дерново-глубокоподзолистым освоенным дерново-подзолистым почвам. На вершине и на склоне преобладают дерново-слабоподзолистые освоенные дерново-подзолистые почвы; местами отмечаются признаки оглеения. Характеристика участка дана по данным Электронной почвенной карты Чашниково (Кириллова, Силёва, 2015).

Образцы почвы были отобраны в октябре 2020 г.; до этого на поле возделывался картофель. Всего было отобрано 9 образцов: три у подножия склона (1.1, 1.2, 1.3), три в средней части склона, соответствующие средне- или слабосмытым почвам (2.1, 2.2, 2.3), и три на выровненной поверхности вершины (3.1, 3.2, 3.3). Превышение самой высокой точки над самой низкой составляет около 7.1 м; склон пологий, с уклоном от 1 до 5°. Образцы отбирали методом конверта из верхнего 20-сантиметрового слоя.

Отобранные образцы были высушены до воздушно-сухого состояния и разделены на четыре группы агрегатов: > 5 мм, 5–

2 мм, 2–1 мм и < 1 мм. Такое разделение опиралось на работы Д.В. Хана (1969) и В.Г. Мамонтова с соавторами (2019). Согласно этим исследованиям, агрегаты диаметром 5–1 мм являются наиболее агрономически ценными. Кроме того, по данным В.Г. Мамонтова (2019), полученным для черноземных почв на основе изменения соотношения гумусовых кислот, агрегаты 2–1 мм наиболее устойчивы к обработке и наименее изменчивы, чем и может объясняться их полное или локальное доминирование в гумусовых горизонтах черноземов.

Содержание органического углерода определяли по методу Тюрина в модификации Никитина с колориметрическим окончанием в двух повторностях. Подвижный фосфор определяли по Кирсанову (в двух повторностях). Для оценки минерального и органического фосфора использовали метод прокаливания Сандерса и Вильямса, поскольку он обеспечивал наиболее воспроизводимые результаты (Денисова и др., 2021). Этот метод не позволяет полностью перевести фосфор в раствор; степень извлечения составляет 70–90% от валового содержания, поэтому в работе используется понятие общего фосфора. Для определения валового фосфора применяли рентгенофлуоресцентный анализ (РФА). Измерения выполняли на спектрометре “Респект” (Россия) в однократной повторности для каждого варианта. Пробы предварительно измельчали, просеивали через сито с диаметром отверстий 0.25 мм и прессовали в виде таблеток. Результаты, полученные на приборе, выражали в процентах; затем для трех точек каждого варианта рассчитывали среднее значение и стандартное отклонение. Валовое содержание элемента в почве является важным интегральным показателем, а применение рентгенофлуоресцентного анализа позволяет с минимальной погрешностью сопоставлять содержание элементов в различных типах почв (Карпова, Минеев, 2015).

Полученные данные обрабатывали в программе Statistica. Влияние факторов расположения на склоне и размера агрегатов оценивали с помощью факторного дисперсионного анализа (Factorial ANOVA) при однородности дисперсий. В случае неоднородности дисперсий использовали непараметрический анализ Kruskal–Wallis ANOVA by Ranks. Кроме того, рассчитывали ко-

эфициенты корреляции и наименьшую существенную разность. На заключительном этапе фракцию < 1 мм дополнительно разделили на подфракции 1–0.5; 0.5–0.25; 0.25–0.1 и < 0.1 мм для оценки водопрочности структуры и проверки гипотез, возникших в ходе работы.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Установлено изменение процентного соотношения агрегатов между почвами вершины, склона и подножия. Во всех образцах преобладают агрегаты диаметром > 5 мм. В почве у подножия склона, особенно по сравнению с почвой средней части склона, возрастает содержание агрегатов < 1 мм, прежде всего за счет самой мелкой проанализированной фракции < 0.1 мм. Это указывает на аккумуляцию мелкодисперсного материала у подножия и согласуется с проявлением эрозионного перераспределения вещества. Агрегаты размером 1–5 мм существенных изменений не демонстрируют. Что касается водопрочности структуры, то для вершины отмечено значимое уменьшение количества агрегатов > 5 мм после мокрого просеивания. Для почв склона и подножия уменьшение содержания водопрочных агрегатов > 5 мм статистически незначимо. Вместе с тем для всех почв отмечена тенденция к превышению содержания водопрочных агрегатов < 1 мм над соответствующими воздушно-сухими фракциями, особенно для частиц < 0.25 мм.

Содержание органического углерода в воздушно-сухих агрегатах исследованных почв выше среднего уровня, характерного для дерново-подзолистых почв. По литературным данным, содержание гумуса в верхнем горизонте дерново-подзолистых и подзолистых почв обычно составляет 2–3% (Ковда, Розанов, 1988), тогда как в наших образцах оно колеблется от 3.5 до 6.7% (рис. 1). Вероятно, это связано с регулярным внесением органических удобрений, в частности конского навоза.

Содержание углерода в почвах разного положения на склоне различается незначительно. Также практически не выявлено различий по содержанию углерода между исходными фракциями агрегатов, что в целом соответствует литературным данным. Исключение составляет фракция < 1 мм у подножия склона, в кото-

рой содержание углерода статистически значимо ниже по сравнению с вариантами вершины и склона. Для уточнения этого отличия фракцию < 1 мм разделили на подгруппы (1–0.5; 0.5–0.25; 0.25–0.1 и < 0.1 мм) и проанализировали содержание углерода в них. Установлено, что в подфракциях 0.5–0.1 мм у подножия склона содержание углерода значительно ниже, чем в почве склона и вершины. Для фракции 1–0.5 мм также отмечена тенденция к снижению. При этом для воздушно-сухих агрегатов < 0.1 мм у подножия содержание углерода сопоставимо с вариантами средней части и вершины склона. Именно с этой фракцией в пахотной почве может быть связано значительное количество органических соединений; такие частицы способны образовывать более крупные агрегаты при циклах увлажнения–иссушения и замерзания–оттаивания (Холодов, 2020). Вероятно, поэтому содержание углерода в этой фракции сопоставимо с его содержанием в агрегатах > 1 мм.

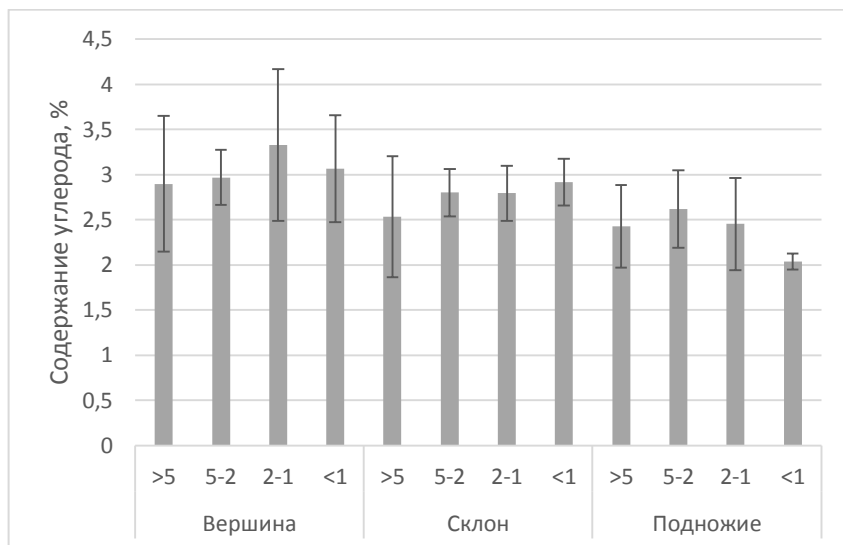


Рис. 1. Содержание органического углерода в агрегатах, %.

Fig. 1. Organic carbon concentration in air-dry aggregates, %.

Существенных различий между содержанием углерода в водопрочных и воздушно-сухих агрегатах не выявлено. Это соответствует данным В.А. Холодова (2020), согласно которым водопрочность агрегатов не определяется напрямую содержанием в них углерода. В почве у подножия склона наблюдается несколько иная тенденция: содержание углерода в агрегатах > 5 , $5-2$, $2-1$ и $1-0.5$ мм близко к значениям для почв, расположенных выше по склону, однако в агрегатах $0.5-0.25$ мм оно заметно снижается. Минимальные значения углерода (около $1.1-1.8\%$) отмечены именно у подножия склона. Возможно, фракция $0.5-0.25$ мм здесь в большей степени представлена минеральными компонентами. Не исключено также, что часть смытого по склону органоминерального материала переходит в более крупные агрегаты в ходе циклов увлажнения–высыхания (Холодов, 2020).

Среднее содержание доступного фосфора в исследованных почвах соответствует литературным данным (Минеев, 2004). В неразделенной почве содержание подвижного фосфора составляло 38.17 ± 8.01 ; 22.76 ± 4.24 и 22.09 ± 6.48 мг/100 г для почв вершины, склона и подножия соответственно. Это указывает на статистически значимое отличие почв вершины от двух остальных положений рельефа. Максимальные значения подвижного фосфора приурочены к вершине склона; при перемещении вниз по склону содержание снижается, тогда как различия между вариантами склона и подножия статистически не выявлены. Сходная картина описана для черноземов на склоне южной экспозиции (Губарев и др., 2019).

Анализ содержания подвижного фосфора в агрегатах подтвердил, что во всех фракциях почвы вершины его содержание статистически значимо выше, чем в почвах склона и подножия. В целом подвижный фосфор распределен между агрегатами относительно равномерно; явного преобладания какой-либо фракции в его аккумуляции не выявлено (рис. 2).

Было также проанализировано содержание подвижного фосфора в водопрочных агрегатах (табл. 1).

Таблица 1. Содержание подвижного фосфора в водопрочных агрегатах

Table 1. Distribution of mobile phosphorous in water-stable aggregates

Расположение	Размер агрегатов	Содержание подвижного P_2O_5 , мг/100 г почвы
Вершина	> 5	19.95 ± 4.65
	5–2	23.55 ± 12.85
	2–1	16.18 ± 10.71
	1–0.5	23.39 ± 7.56
	0.5–0.25	19.72 ± 5.11
Склон	> 5	19.93 ± 9.66
	5–2	19.35 ± 11.70
	2–1	26.14 ± 5.27
	1–0.5	29.84 ± 0.85
	0.5–0.25	23.40 ± 0.80
Подножие	> 5	21.27 ± 2.27
	5–2	14.67 ± 5.24
	2–1	17.92 ± 2.37
	1–0.5	21.95 ± 1.80
	0.5–0.25	20.48 ± 0.07

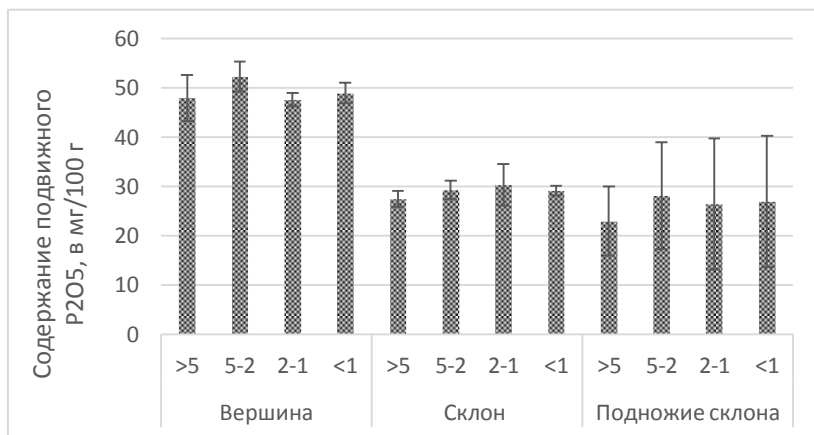


Рис. 2. Содержание подвижного фосфора в воздушно-сухих агрегатах.
Fig. 2. Mobile phosphorus concentration in air-dry aggregates.

Наблюдается снижение его содержания по сравнению с воздушно-сухими агрегатами, что закономерно для наиболее лабильных форм фосфора, частично удаляемых при воздействии воды. При этом часть соединений фосфора, не переходящих в раствор при промывании водой, может извлекаться слабыми кислотами, имитирующими воздействие корневых выделений (Аринушкина, 1970). Примечательно, что для почв склона и подножия снижение содержания подвижного фосфора выражено слабее, чем для почвы вершины. Вероятно, это связано с тем, что в природных условиях почвы склона и подножия в большей степени подвержены действию воды, по сравнению с водораздельной частью, вследствие чего различия между воздушно-сухими и водопрочными агрегатами здесь менее контрастны.

Абсолютные значения показателя варьируют достаточно сильно, однако статистически достоверного влияния размера агрегатов на содержание подвижного фосфора в водопрочных агрегатах вершины, склона и подножия не выявлено.

Для минерального фосфора также установлено превышение значений в почвах вершины по сравнению с почвами склона и подножия для агрегатных групп > 5, 2–1 и < 1 мм. На склоне

наибольшее содержание минерального фосфора отмечено в агрегатах 5–2 мм, тогда как в остальных группах его значения близки. У подножия склона повышенное содержание минерального фосфора также приурочено к агрегатам 5–2 и 2–1 мм по сравнению с агрегатами > 5 и < 1 мм (рис. 3). Таким образом, статистически значимо влияние обоих факторов – положения на склоне и размера агрегатов. При этом в почвах склона и подножия аккумуляция минерального фосфора в большей степени связана с агрономически ценными агрегатами размером 5–2 мм (рис. 4, 5).

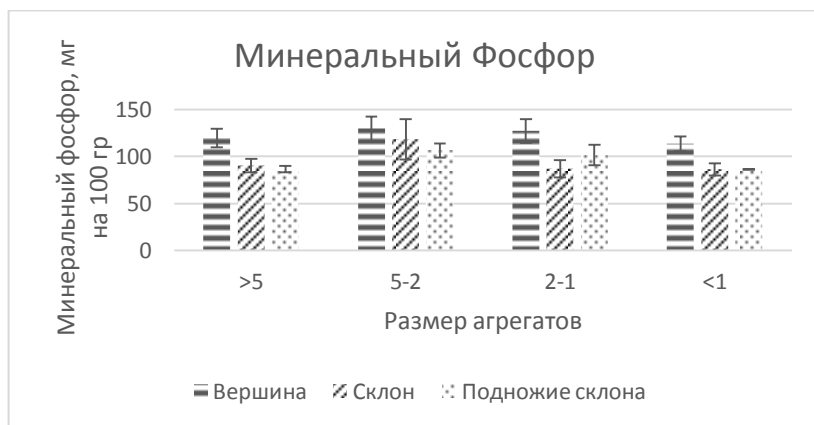


Рис. 3. Содержание минерального фосфора в воздушно-сухих агрегатах, мг/100 г.

Fig. 3. Mineral phosphorous concentrations in air-dry aggregates, mg/100 g.

LSD test; variable Pmin (Spreadsheet15.sta)				
Probabilities for Post Hoc Tests				
Error: Between MS = 188,40, df = 24,000				
Cell No.	Расположение	{1} 112,37	{2} 95,389	{3} 95,116
1	1		0,005770	0,005137
2	2	0,005770		0,961620
3	3	0,005137	0,961620	

Рис. 4. HCP-тест в программе Statistica для распределения минерального фосфора в зависимости от положения на склоне.

Fig. 4. Fisher LSD test (Statistica program) represents the variation of mobile phosphorus across the slope (where 1 – top, 2 – slope and 3 bottom).

		LSD test; variable Pmin (Spreadsheet15.sta) Probabilities for Post Hoc Tests Error: Between MS = 188,40, df = 24,000			
Cell No.	Размер	{1} 93,826	{2} 116,12	{3} 102,43	{4} 91,457
1	>5		0,002108	0,196013	0,717463
2	5-2	0,002108		0,044969	0,000847
3	2-1	0,196013	0,044969		0,102789
4	<1	0,717463	0,000847	0,102789	

Рис. 5. НСР-тест в программе Statistica: сравнение распределения минерального фосфора в агрегатах разного размера.

Fig. 5. Fisher LSD test (Statistica program) represents the variation of mobile phosphorus in different sized aggregates.

Для органического фосфора влияние исследуемых факторов статистически не выявлено. Тем не менее в почвах вершины прослеживается тенденция к аккумуляции органического фосфора в частицах < 1 мм: его содержание в этой фракции выше, чем в более крупных агрегатах. При движении вниз по склону эти различия нивелируются на фоне больших величин ошибки (рис. 6).

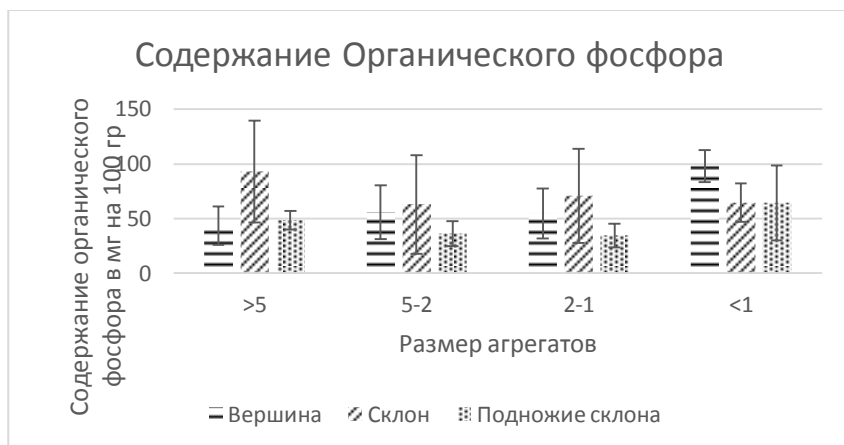


Рис. 6. Содержание органического фосфора в воздушно-сухих агрегатах, мг/100 г.

Fig. 6. The concentration of organic phosphorus in air-dry aggregates, mg/100 g.

Валовое содержание фосфора составляет порядка 400 мг/100 г почвы, что соответствует примерно 0.4–0.5% в пересчете на сухую массу. Для дерново-подзолистых почв это высокие значения: по литературным данным, обычно они находятся в пределах около 0.05–0.15% (Кидин, 2016). Выявлено статистически значимое снижение содержания валового фосфора у подножия склона по сравнению с почвами вершины, тогда как почвы склона занимают промежуточное положение (рис. 7).

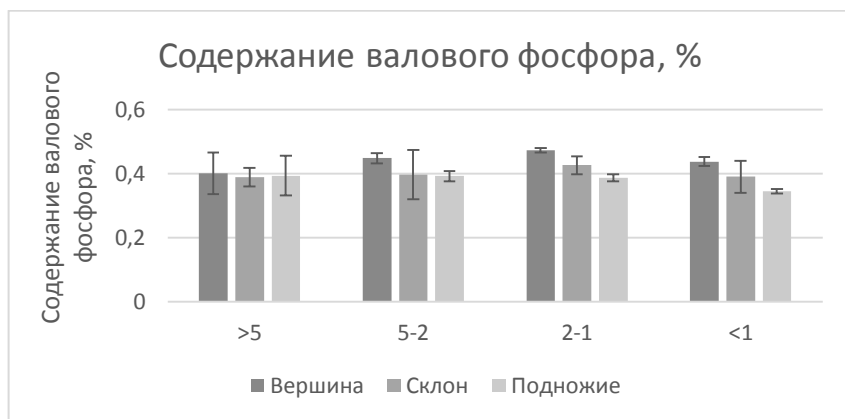


Рис. 7. Содержание валового фосфора в воздушно-сухих агрегатах, %.

Fig. 7. The concentration of total phosphorous in air-dry aggregates, %.

Анализ распределения валового фосфора по воздушно-сухим агрегатам (рис. 7) показал, что у подножия склона его содержание в агрегатах < 1 мм ниже, чем в остальных фракциях. На вершине аналогичная тенденция выражается в том, что содержание валового фосфора в агрегатах < 1 мм ниже, чем в агрегатах 2–1 мм.

ВЫВОДЫ

Несмотря на аккумуляцию мелкой почвенной фракции и агрегатов диаметром < 1 мм у подножия склона, накопления фосфора в нижней части склона не выявлено. Для ряда показателей установлена зависимость от положения на склоне; минимальные

значения нередко приурочены к наиболее мелким фракциям у подножия, что может указывать на транзитный характер этой части катены для части органоминерального материала. Содержание углерода в воздушно-сухих агрегатах в целом распределено относительно равномерно между фракциями, однако для фракции < 1 мм у подножия склона выявлено статистически значимое снижение. Содержание углерода в водопрочных агрегатах в большинстве случаев сопоставимо с его содержанием в воздушно-сухих агрегатах.

Подвижный и валовой фосфор в воздушно-сухих агрегатах характеризуются высокими значениями, особенно на вершине склона, однако вниз по склону их содержание снижается. При этом различия между почвой средней части склона и подножия для ряда показателей статистически не подтверждаются. Анализ неразделенной почвы показывает ту же тенденцию для подвижного и валового фосфора. После процедуры оценки водопрочности структуры различия по содержанию подвижного фосфора между элементами рельефа выражены слабее, что, вероятно, связано с частичным удалением наиболее лабильных форм фосфора при воздействии воды.

В исследованных почвах выявлено высокое содержание минерального и органического фосфора, при этом преобладание минеральных форм над органическими соответствует общим закономерностям для дерново-подзолистых почв. Для почв вершины характерно более высокое содержание минерального фосфора по сравнению с почвами склона и подножия. В воздушно-сухих агрегатах размером 5–2 мм наблюдается тенденция к повышенной аккумуляции минерального фосфора, наиболее отчетливо выраженная в почвах склона и подножия. Для органического фосфора статистически значимого влияния положения на склоне и размера агрегатов не установлено.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аринушкина Е.В.* Руководство по химическому анализу почв. М.: Издательство Московского университета, 1970. 488 с.
2. *Губарев Д.И., Вайгант А.А., Ларькин М.А.* Неоднородность почвенно-агрохимических показателей чернозема обыкновенного в условиях

выраженного рельефа. URL:
https://www.arisersar.ru/conference/soil_science-19/Gubarev.pdf.

3. Денисова Г.И., Карпова Д.В., Иванова Е.А., Рогова О.Б. Фосфор в воздушно-сухих агрегатах Курского чернозема в различных типах антропогенно-обустроенного ландшафта // Агрохимический вестник. 2021. № 5. С. 84–89.

4. Иванов А.Л. Агробиогеохимический цикл фосфора / Ред. Иванов А.Л. / Сычев В.Г., Державин Л.М., Адрианов С.Н., Бразжникова Н.В., Карпова Д.В., Карпухин А.И., Кирпичников Н.А., Конончук В.Д., Саймолов Л.Н. М.: Россельхозакадемия, 2012. 512 с.

5. История и современное состояние научных исследований в Учебно-опытном почвенно-экологическом центре Московского Университета “Чашниково”: / Под ред. Шобы С.А., Макарова О.А., Загоруйко М.В. М.: Издательство Московского Университета, 2019. 197 с.

6. Кидин В.В., Торшин С.П. Агрохимия. М.: Проспект, 2016. 608 с.

7. Карпова Е.А., Минеев В.Г. Тяжелые металлы в агроэкосистеме. М.: КДУ, 2015. 252 с.

8. Кириллова Н.П., Силёва Т.М. Таксономическая диагностика почв с помощью автоматизированного определителя // Вестник Московского Университета. Сер. 17. Почвоведение. 2015. № 3. С. 31–36.

9. Мамонтов В.Г., Родионова Л.П., Артемьева З.С., Крылов В.А., Клышбекова Г.К. Агрогенная и постагрогенная трансформация структурного состояния чернозёма типичного Курской области // Международный сельскохозяйственный журнал. 2019. № 5 (371). С. 14–17.

10. Медведев И.Ф., Бузуева А.С., Губарев Д.И., Ефимова В.И., Деревягин С.С. Рельеф и особенности внутрипочвенной миграции питательных элементов в агроландшафте // Агрохимический вестник. 2016. № 6. С. 14–19.

11. Минеев В.Г. Агрохимия. М.: Издательство МГУ, Издательство “КолосС”, 2004. 720 с.

12. Почвоведение / Под ред. В.А. Ковды, Б.Г. Розанова. Ч. 2. Типы почв, их география и использование. М.: Высшая школа, 1988. 368 с.

13. Приказ Минсельхоза России от 13.12.2016 N 552 “Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения” (Зарегистрировано в Минюсте России 13.01.2017 N 45203).

14. Хан. Д.В. Органоминеральные соединения и структура почвы. М.: Наука, 1969. 141 с.

15. *Холодов В.А.* Механизмы восстановления структуры и органического вещества гумусовых горизонтов почв на разных уровнях иерархии организации: Автореферат дисс. ... канд. с-х. наук. М., 2020. 45 с.
16. *Alewel C., Ringeval B., Ballabio C., Robinson D.A., Panagos P., Borrelli P.* Global phosphorus shortage will be aggravated by soil erosion // *Nature Communications*, 2020. Vol. 11. 4546.
17. *Chen H., Jarosch K.A., Mészáros É., Frossard E., Zhao X., Oberson A.* Repeated drying and rewetting differently affect abiotic and biotic soil phosphorus (P) dynamics in a sandy soil: A ³³P soil incubation study // *Soil Biology and Biochemistry*. 2021. Vol. 153. 108079.
18. *Corbee G.* Phosphorus accumulation in constructed wetlands: a study of 10 wetlands constructed on agricultural clay soils in Södermanland. Independent thesis Advanced level (professional degree). Master Programme in Environmental and Water Engineering. 2021. 60 p.
19. *Evans N.M., Stewart W.P., Davis M.A.* Phosphorous, farms, and families: Institutional narratives about agricultural intensification and water quality in northeastern Wisconsin // *Journal of Rural Studies*. 2020. Vol. 80. P. 418–426.
20. *Han J.G., Li Z.B., Li P., Tian J.L.* Nitrogen and phosphorous concentrations in runoff from a purple soil in an agricultural watershed // *Agricultural Water Management*. 2010. Vol. 97. P. 757–762.
21. *Huang D., Zhou L., Fan H., Jia Y., Liu M.* Responses of aggregates and associated soil available phosphorus, and soil organic matter in different slope aspects, to seasonal freeze–thaw cycles in Northeast China // *Geoderma*. 2021. Vol. 402. 115184.
22. *Li Y., Wang L., Zhang S., Tian L., Ou Y., Yan B., Cui H., Bao M., Liang A.* Freeze-thaw cycles increase the mobility of phosphorus fractions based on soil aggregate in restored wetlands // *CATENA*. 2022. Vol. 209. Part 2. 105846.
23. *Liu Y., Feng L., Hu H., Jiang G., Cai Z., Deng Y.* Phosphorus release from lowgrade rock phosphates by low molecular weight organic acids // *J. Food Agric. Environ.* 2012. No. 10. P. 1001–1007.

REFERENCES

1. *Arinushkina E.V., Manual on Chemical Analysis of Soils*, Moscow: University Publishing House, 1970, 488 p. (In Russ.)
2. *Gubarev D.I., Vaigant A.A., Larkin M.A., Heterogeneity of soil-agrochemical indicators of ordinary chernozem in the conditions of pronounced relief*, URL: https://www.arisersar.ru/conference/soil_science-19/Gubarev.pdf. (In Russ.)

3. Denisova G.I., Karpova D.V., Ivanova E.A., Rogova O.B., Phosphorus in air-dry aggregates of Kursk chernozem in different types of anthropogenic landscapes, *Agrochemical Bulletin*, 2021, No. 5, pp. 84–89. (In Russ.)
4. Ivanov A.L. (Ed.), Sychev V.G., Derzhavin L.M., Adrianov S.N., Brazhnikova N.V., Karpova D.V., Karpukhin A.I., Kirpichnikov N.A., Kononchuk V.D., Saimolov L.N., *Agrobiogeochemical cycle of phosphorus*, Moscow: Rosselkhozakademia, 2012, 512 p. (In Russ.)
5. Shoba S.A., Makarov O.A., Zagoruiko M.V., *History and current state of scientific research in the Training and Experimental Soil Ecological Centre of Moscow*, Soil-Ecological Centre of Moscow University "Chashnikovo", 2019, Moscow: Moscow University Press, 197 p. (In Russ.)
6. Kidin V.V., Torshin S.P., *Agrochemistry*, Moscow: Prospect, 2016, 608 p.
7. Karpova E.A., Mineev V.G., *Heavy metals in agroecosystem*, Moscow, 2015, 252 p. (In Russ.)
8. Kirillova N.P., Silyova T.M., Taxonomic diagnostics of soils with the help of an automated identifier, *Vestnik of Moscow University*, Ser. 17, Soil Science, 2015, No. 3, pp. 31–36. (In Russ.)
9. Mamontov V.G., Rodionova L.P., Artemyeva Z.S., Krylov V.A., Klyshbekova G.K., Agrogenic and postagrogenic transformation of the structural state of typical chernozem of Kursk region, *International Agricultural Journal*, 2019, No. 5 (371), pp.14–17. (In Russ.)
10. Medvedev I.F., Buzueva A.S., Gubarev D.I., Efimova V.I., Derevyagin S.S., Relief and features of intra-soil migration of nutrient elements in agrolandscape, *Agrochemical Bulletin*, 2016, No. 6, pp. 14–19. (In Russ.)
11. Mineev V.G., *Agrochemistry*, Moscow: MSU Publishing House, KolosS Publishing House, 2004, 720 p. (In Russ.)
12. Kovda V.A., Rozanov B.G. (Eds), *Soil science. Part. 2. Types of soils, their geography and utilisation*, Moscow: Higher School, 1988, 368 p. (In Russ.)
13. *Order of the Ministry of Agriculture of Russia from 13.12.2016 N 552* "On approval of water quality standards of water bodies of fishery importance, including standards of maximum permissible concentrations of harmful substances in the waters of water bodies of fishery importance" (Registered with the Ministry of Justice of Russia on 13.01.2017 N 45203). (In Russ.)
14. Khan. D.V., *Organomineral compounds and soil structure*, Moscow: Nauka, 1969, 141 p. (In Russ.)
15. Kholodov V.A., *Mechanisms of restoration of structure and organic matter of humus horizons of soils at different levels of the hierarchy of organization*, *Extended abstract of Cand. Agri. Sci. thesis*, 03.00.27. Moscow: V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, 2020, 45 p. (In Russ.)

16. Alewell C., Ringeval B., Ballabio C., Robinson D. A., Panagos P., Borrelli P., Global phosphorus shortage will be aggravated by soil erosion, *Nature Communications*, 2020, Vol. 11. 4546.
17. Chen H., Jarosch K.A., Mészáros É., Frossard E., Zhao X., Oberson A., Repeated drying and rewetting differently affect abiotic and biotic soil phosphorus (P) dynamics in a sandy soil: A ^{33}P soil incubation study, *Soil Biology and Biochemistry*, 2021, Vol. 153. 108079.
18. Corbee G., Phosphorus accumulation in constructed wetlands: a study of 10 wetlands constructed on agricultural clay soils in Södermanland. Independent thesis Advanced level (professional degree). Master Programme in Environmental and Water Engineering, 2021, 60 p.
19. Evans N.M., Stewart W.P., Davis M.A., Phosphorous, farms, and families: Institutional narratives about agricultural intensification and water quality in northeastern Wisconsin, *Journal of Rural Studies*, 2020, Vol. 80, pp. 418–426.
20. Han J.G., Li Z.B., Li P., Tian J.L., Nitrogen and phosphorous concentrations in runoff from a purple soil in an agricultural watershed, *Agricultural Water Management*, 2010, Vol. 97, pp. 757–762.
21. Huang D., Zhou L., Fan H., Jia Y., Liu M., Responses of aggregates and associated soil available phosphorus, and soil organic matter in different slope aspects, to seasonal freeze–thaw cycles in Northeast China, *Geoderma*, 2021, Vol. 402. 115184.
22. Li Y., Wang L., Zhang S., Tian L., Ou Y., Yan B., Cui H., Bao M., Liang A., Freeze-thaw cycles increase the mobility of phosphorus fractions based on soil aggregate in restored wetlands, *CATENA*, 2022, Vol. 209, Part 2, 105846.
23. Liu Y., Feng L., Hu H., Jiang G., Cai Z., Deng Y., Phosphorus release from lowgrade rock phosphates by low molecular weight organic acids, *J. Food Agric. Environ*, 2012, No. 10, pp. 1001–1007.

УДК 631.874

DOI: 10.19047/0136-1694-2026-128-194-213



Ссылки для цитирования:

Степанова Е.С. Фитомелиоранты для засоленных и солонцеватых почв Причерноморья // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2026. Вып. 128. С. 194-213. DOI: 10.19047/0136-1694-2026-128-194-213

Cite this article as:

Stepanova E.S., Phyto-ameliorants for saline and solonetzic soils of the Black Sea Region, Dokuchaev Soil Bulletin, 2026, V. 128, pp. 194-213, DOI: 10.19047/0136-1694-2026-128-194-213

Благодарность:

Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания по теме: “Рациональное использование природных ресурсов и повышение устойчивости агроценозов”, регистрационный номер НИОКТР 124040200008-7.

Acknowledgments:

The research was supported financially by the federal budget, specifically for the implementation of a state assignment on the topic “Rational Use of Natural Resources and Increasing the Sustainability of Agroecosystems”. The registration number for this research and development work is 124040200008-7.

Фитомелиоранты для засоленных и солонцеватых почв Причерноморья

© 2026 г. Е. С. Степанова

*“Мелитопольский государственный университет”, Россия,
272312, Мелитополь, пр-т Богдана Хмельницкого, 18, ,
<https://orcid.org/0009-0003-6547-2199>,
e-mail: yekaterina.stepanova.22@mail.ru.*

*Поступила в редакцию 27.05.2025, после доработки 28.01.2026,
принята к публикации 29.04.2026*

Резюме: Почвы, подверженные засолению и солонцовому процессу, занимают 18.2% от площади сельскохозяйственных угодий в России (включая Крым). На период 2022–2024 гг. информации о площади засоленных земель в Херсонской и Запорожской областях Российской федерации отсутствуют. В Херсонской области ранее зафиксировано, что

46.16% пахотных земель засолены, а в Запорожской области – 20%. Фитомелиоративный эффект зеленых удобрений заключается в их способности увеличивать накопление гумуса в почве и очищать почву от вредных элементов, в том числе засоления. Зеленые удобрения представляют собой ключевой ресурс для восстановления почвенного плодородия и внесения в почву безопасных для экологии органических элементов. Каждый вид зеленых удобрений имеет свои уникальные особенности возделывания, которые зависят от климатических условий, типа почвы и конкретных задач, стоящих перед исследователями. Их эффективность заключается в способности улучшать структуру почвы, повышать уровень органических веществ и обогащать ее необходимыми питательными элементами. При длительном применении таких удобрений наблюдаются позитивные изменения различных почвенных характеристик: увеличивается запас питательных элементов, снижается кислотность, повышается содержание кальция и других щелочных компонентов, а также растут такие параметры, как поглощательная способность, буферность, влагосодержание, пористость и проницаемость для воды. Классификация зеленых удобрений осуществляется на основе их функций в севообороте и методов обработки, а также применения в качестве питательных элементов. Сидераты могут быть отнесены к различным категориям в зависимости от их роли в агрономии и влияния на состояние почвы. Для засоленных почв Херсонской и Запорожской областей предлагается использовать следующие фитомелиоранты: горчицу, амарант, ячмень и донник.

Ключевые слова: классификация зеленых удобрений; сидераты; горчица; донник; амарант.

Phyto-ameliorants for saline and solonetzic soils of the Black Sea Region

© 2026 E. S. Stepanova

Melitopol State University,

18 prosp. Bogdana Khmel'nitskogo, Melitopol' 722312, Russian Federation,

<https://orcid.org/0009-0003-6547-2199>,

e-mail: yekaterina.stepanova.22@mail.ru.

Received 27.05.2025, Revised 28.01.2026, Accepted 29.04.2026

Abstract: Soils subject to salinization occupy 18.2% of agricultural land in Russia (including Crimea). There is no information about the area of saline lands in Kherson and Zaporizhzhia regions of Russia for the period 2022-2024. In Kherson, 46.16% arable land was saline, and 20% in Zaporizhzhia.

The phyto-remediation effect of green fertilizers includes their ability to accumulate humus and purify soil from harmful substances, including salinity. Green fertilizers are key resources for restoring soil fertility and adding organic matter to the soil. Different types of green fertilizer have different cultivation requirements depending on climate, soil type, and research goals. Their effectiveness lies in their ability to improve the structure of soil, increase the level of organic matter and enrich it with essential nutrients. Prolonged use of such fertilizers leads to positive changes in soil characteristics: the supply of nutrients increases, acidity decreases, calcium and other alkaline components increase, and parameters such as absorption capacity, buffering, moisture content and porosity increase. The classification of green fertilizers depends on their function in crop rotation, processing methods and use as nutrients. Green fertilizers can be classified according to their role in agriculture and their impact on soil conditions. For the saline soils in the Kherson and Zaporizhzhia regions, the following phytomeliorants have been proposed: mustard, amaranth, barley, and sweet clover.

Keywords: green fertilizer's classification; siderates; mustard; sweet clover; and amaranth.

ВВЕДЕНИЕ

Применение зеленых удобрений актуально для уменьшения антропогенной нагрузки на почву, предотвращения деградации и повышения плодородия почв, увеличения урожайности сельскохозяйственных культур. Мелиорация засоленных земель, основанная на внесении химических мелиорантов часто приводит к возникновению экологических проблем, поэтому перспективны биологические методы мелиорации, в том числе фитомелиорация. Засоление почв распространено в степных условиях, для которых характерен засушливый климат. Степная зона является основной для выращивания озимой пшеницы. В условиях засоления почв урожайность озимой пшеницы значительно снижается. Зеленые удобрения – важнейший источник возобновления плодородия почвы и обогащения ее экологически безопасными органомогенными элементами, а также могут выполнять роль фитомелиоранта. Классификация растений, используемых в качестве зеленых удобрений, недостаточно изучена, в разных источниках можно найти только отдельные элементы, поэтому нашей задачей является составление более полной классификации, выделение признаков, по которым можно

подбирать фитомелиоранты для засоленных почв. В мире используется несколько понятий для зеленого удобрения. В нашей стране термин сидераты и зеленые удобрения считаются синонимами (Борисова, 2015; Приходько и др., 2020; Стрельников и др., 2018). В других странах используют термин зеленое удобрение (green fertilizer), либо зеленый навоз (green manure) и покровная культура (cover crop). А в странах с жарким климатом используют понятие теневые культуры (shade crops), которые обеспечивают снижение температуры почвы и в дальнейшем выполняют роль зеленого удобрения (Adrian et al., 1927; Eichler-Löbermann et al., 2008; Siwek et al., 2024; Arazmjoo et al., 2022). Термин “покровная культура” был впервые использован профессором L.H. Bailey для обозначения культуры, специально посаженной для укрытия земли зимой и служащей защитой для корней деревьев. В США термин “покровная культура”, как правило, вытесняет термин “сидеральная культура”, так что эти два термина в значительной степени стали синонимами. “Промежуточная культура” (catch crop) может также использоваться в качестве сидеральной культуры, и действительно, значительная часть сидерального удобрения производится с помощью промежуточных культур (Adrian et al., 1927; Eichler-Löbermann et al., 2008).

Классификация зеленых удобрений основывается на их роли в севообороте, а также на методах их обработки и применения в качестве удобрений. Сидераты могут быть распределены по различным категориям в зависимости от того, какую функцию они выполняют в агрономической практике и как их использование влияет на состояние почвы. Разные виды зеленых удобрений имеют свои особенности возделывания, которые определяются климатическими условиями, типом почвы и конкретными агрономическими задачами. Эффективность их применения заключается в способности улучшать структуру почвы, увеличивать содержание органических веществ и обогащать ее питательными элементами. Таким образом, правильный выбор и использование зеленых удобрений не только способствует повышению плодородия почвы, но и помогает обеспечить устойчивость агроэкосистем к негативным факторам внешней среды.

В нашем исследовании мы хотели установить с помощью

какого критерия в классификации зеленых удобрений следует подбирать фитомелиоранты для засоленных почв Херсонской и Запорожской областей России.

ОБЪЕКТЫ

По данными FAO, засоленные почвы занимают около 17.4% всех сельскохозяйственных земель. По данным 118 стран, 4.4% верхнего слоя почвы и более 8,7% (слой почвы 30 – 100 см) от общей площади суши подвержены воздействию соли. Эти площади расширяются из-за изменения климата, что усиливает накопление солей в почвах в силу увеличения площади засушливых земель, нерационального их использования и дефицита воды. Засоление является стрессовым фактором, который приводит к потере сельскохозяйственной продукции (Global, 2021).

Площадь сельскохозяйственных угодий в России (включая Крым) составляет 197.8 млн га, из них деградации подвержены 53.3%, в том числе засолению и солонцовому процессу – 18.2% (Панкова и др., 2020). Наибольшие площади из 22.9 млн га засоленных почв России находятся в лесостепной, степной и полупустынной зонах (Панкова и др., 2019).

На период 2022–2024 гг. информация о площади засоленных земель в Херсонской и Запорожской областях Российской Федерации отсутствует. В Херсонской области в 2016 г. 46.16% пахотных земель были засолены (Регіональна..., 2017).

В 2019 г. в Запорожской области в Мелитопольском районе площадь незасоленных орошаемых земель составляла 15 410 га, слабосолонцеватых – 7 695 га, среднесолонцеватых – 149 га, а в Акимовском районе площадь несолонцеватых земель составляла 1 668 га, слабосолонцеватых – 40 187 га, среднесолонцеватых – 7 950 га, сильносолонцеватых – 805 га (Гришко и др., 2019).

Значительные колебания уровня минерализованных подпочвенных вод в Запорожской области, которые залегают на глубине 2–2.5 м и засолены хлоридами и сульфатами, а также капиллярная связь их с поверхностью почвы, промывка паводковыми водами привели к тому, что черноземно-луговые почвы Запорожской области имеют все признаки и свойства солонцеватых и солончаковых. Солонцеватые почвы характеризуются содержанием натрия

более 5% от суммы обменных катионов (Гришко и др., 2021).

Земельные ресурсы Херсонской области представлены в основном черноземами южными и темно-каштановыми почвами. Встречаются разные типы засоления, но преобладает сульфатный и смешанный. Одним из источников засоления в Херсонской и Запорожской областях является эоловое распространение солей с Азовского и Черного морей. Воды Азовского моря имеют сульфатный тип засоления, поэтому на почвах, находящихся вблизи моря, преобладает сульфатный тип засоления.

КЛАССИФИКАЦИЯ ЗЕЛЕННЫХ УДОБРЕНИЙ

В качестве зеленых удобрений используют в основном травянистые растения.

Впервые упоминание о классификации зеленых удобрений отмечено в работе “Фосфориты и сидерация” русского ученого А.Н. Энгельгардта. Он определил возможные варианты сидерации в севооборотах на тяжелых подзолистых почвах Смоленской губернии: клеверосеяние с запашкой на удобрение послеукосных остатков бобовой культуры – “неполная сидерация”, запашка дикой травяной растительности – “естественная сидерация” и запашка посевов гороха – “полная сидерация” (Коваленко, 2014). В современной классификации данные понятия практически не используются.

В основу классификации зеленых удобрений можно положить задачи, которые они выполняют: защищают почву от эрозии, вызванной водными потоками и ветром; уменьшают потери питательных веществ, вызванные вымыванием; вносят в почву органические вещества и биологический азот; перераспределяют питательные элементы из глубинных слоев в плодородный верхний слой почвы; освобождают трудноусвояемые формы фосфора, калия, кальция и магния, заключенные в почве, и вводят их в биологический цикл; улучшают физические, биологические и биохимические характеристики почвы; выступают в роли фитомелиорантов на загрязненных землях; сдерживают рост и развитие сорняков; снижают количество фитопатогенов и энтомологическую нагрузку на культивируемые растения; являются важным ресурсом для кормопроизводства. Прежде всего нужно подобрать зеле-

ное удобрение согласно цели его использования, определить его вид, продолжительность жизни, и только после этого подбирать способ выращивания.

Опыт сельского хозяйства в нашей стране показывает, что с увеличением уровня окультуривания почв и внедрением специализированных севооборотов целесообразно применять промежуточные зеленые удобрения, не нарушая последовательность культур в севообороте, и заменять черный пар сидеральным. Использование сидеральных паров как самостоятельного вида зеленого удобрения оказывается более актуальным на малоокультуренных, бедных органическим веществом и засоленных почвах. Поэтому в Херсонской и Запорожской областях на засоленных почвах более эффективны сидеральные пары, где зеленое удобрение будет выполнять фитомелиоративную функцию.

Зеленые удобрения относятся к двум классам биомелиорантов.

Биомелиоранты – это вещества и организмы, повышающие плодородие почвы и обеспечивающие производство высококачественной экологически безопасной растениеводческой продукции. В классификации биомелиорантов зеленые удобрения присутствуют как в классе органических удобрений (зеленые удобрения), так и в классе фитомелиорантов (Рабинович и др., 2021).

Биомелиоративное воздействие зеленых удобрений заключается в том, что они способствуют накоплению гумуса в почве. При их длительном использовании наблюдается улучшение различных характеристик почвы: увеличивается запас питательных веществ, понижается уровень кислотности, возрастает содержание обменных катионов, а также увеличивается поглощательная способность и буферность, влагоемкость, пористость и водопроницаемость. Почва также обогащается микрофлорой, что приводит к возрастанию ее биологической активности, улучшению агрегатного состава и уменьшению степени уплотнения.

Фитомелиоранты по влиянию на почву делятся на культуры, регулирующие: водный режим, солевой режим, тепловой режим, органическое вещество, санитарное состояние, агрегатный состав.

Мы предлагаем классификацию зеленых удобрений по действию на почву: улучшающие, очищающие и защищающие.

Улучшающие. Способствуют повышению плодородия почвы за счет ее обогащения азотом и другими питательными веществами, улучшению структуры и водоудерживающей способности. К улучшающим зеленым удобрениям относятся бобовые и злаковые культуры.

Очищающие. Способствуют устранению нежелательных элементов из почвы, таких как тяжелые металлы, радионуклиды, соли, кислоты, семена сорной растительности. Очищающие сидераты хорошо подходят для загрязненных и засоленных почв. К ним относятся горчица, ячмень, рапс, редька масличная, сурепица и другие культуры (Макарова, 2021).

Защищающие зеленые удобрения способствуют предотвращению развития болезней и вредителей растений, а также защите почвы от эрозии и пересыхания. Защищающие сидераты хорошо подходят для любых почв. К ним относятся фацелия, календула, ромашка, кореопсис, астра.

Обогащение органическим веществом происходит при выращивании всех видов зеленых удобрений. При использовании бобовых культур происходит обогащение почвы биологическим азотом.

Применение зеленых удобрений способствует улучшению физико-химических свойств почвы и ее структуры. Снижается переувлажнение, предотвращаются водная и ветровая эрозия, вымывание элементов питания за пределы корнеобитаемого слоя.

Благодаря мощным корням зеленые удобрения добывают из нижних почвенных слоев энергетически ценные соединения, которые поступают в почву после заделки. Таким образом увеличивается масса корней в плодородном слое почвы.

По семейству, к которому относятся растения, зеленые удобрения делятся на:

- Бобовые или Мотыльковые (Fabáceae, или Leguminósae) многолетние (донник белый и желтый, клевер ползучий и луговой, люцерна посевная, эспарцет, козлятник или галега восточная, лядвенец рогатый, астрагал длиннолистный и эспарцетовый, сenna) и однолетние (вика озимая, посевная и мохнатая, горох посевной, люпин, сераделла, маш (вигна лучи-

- стая), чина, пажитник, клевер персидский и александрийский, циамописис (гуар), мукуна жгучая, канавалия, вязель пестрый);
- Злаковые или Мятликовые (Gramíneae, или Poáceae) многолетние (райграсс многолетний, английский или пастбищный, суданское сорго, рожь многолетняя, житняк, мискантус, или вёерник) и однолетние (пшеница, ячмень, рожь, тритикале, овес, тимopheевка, райграсс, фестуллум, лисохвост луговой, мятлик луговой, овсяница луговая, костер безостый);
 - Капустные или Крестоцветные (Brassicáceae, или Cruciferae) многолетние (клоповник крупковидный, рыжик озимый) и однолетние (редька масличная, рапс, сурепица, горчица, перко, дайкон, дескурайния Софии, гулявник Лезеля);
 - Водolistниковые или Гидрофильные (Hydrophyllaceae) – фацелия;
 - Астровые или Сложноцветные (Compósitae): подсолнечник, календула, сафлор, титония, сильфия пронзеннолистная;
 - Гречишные или Спорышевые (Polygonáceae) – гречиха;
 - Амарантовые или Щирицевые (Amarantháceae) – амарант.

По длительности жизненного цикла растения, которые используются в качестве зеленых удобрений, делятся на однолетние и многолетние.

У однолетних растений жизненный цикл проходит в течение одного вегетационного периода, то есть за один сезон растение прорастает, цветет, размножается и погибает. К однолетним зеленым удобрениям относятся: райграсс однолетний, сорго суданское, вика посевная, люпин желтый, сераделла, вигна лучистая, чина, пажитник, рапс яровой, сурепица яровая, овес посевной, яровая пшеница, яровой ячмень, амарант, гречиха обыкновенная, горох полевой, клевер александрийский, редька масличная, фацелия.

Двулетние – растения, жизненный цикл которых, проходит за два сезона, причем, в первом не происходит цветение и размножение (редька масличная, белый и желтый донники выступают как однолетние сидераты). К двулетним зеленым удобрениям относятся: календула, дайкон, астрагал, донник лекарственный и другие.

Многолетние – это растения, способные жить несколько лет;

при этом проходя каждый год стадии развития и размножения. К многолетним зеленым удобрениям относятся: люцерна посевная, козлятник, лядвенец рогатый, мискантус, клевер луговой, житняк, клоповник крупковидный (*Lepidium draba*), тимopheевка луговая.

Озимые зеленые удобрения – это однолетние растения, жизненный цикл которых требует перезимовки (от одного до нескольких месяцев) в условиях пониженных температур. К озимым зеленым удобрениям относятся: ячмень, рапс, пшеница, рожь, горох, вика, сурепица, рыжик и другие культуры.

По способу выращивания выделяют несколько видов зеленых удобрений:

- самостоятельные – культуры, которые занимают поле севооборота весь вегетационный период (оно может быть запахано как под озимые, так и под яровые посевы);
- промежуточные, если сидерат высевает между уборкой урожая одной культуры и посевом другой;
- уплотненные зеленые удобрения, которые выращиваются на так называемых смешанных площадках, по соседству с основными культурами или другим сидератом;
- укосные – скашивание и заделка трав на том же поле, или перевоз скошенной биомассы на другое поле;
- отавные – используют для запашки после отрастания рано скошенных однолетних, или многолетних трав.

Промежуточные зеленые удобрения делятся по срокам посева на пожнивные, осенний посев, посев под зиму.

Пожнивные сидераты – это посевы различных культурных растений, которые высеваются после рано убираемых с поля озимых или даже яровых зерновых культур. В пожнивных посевах зеленых удобрений возможно использование максимального числа быстро развивающихся бобовых, зерновых, капустных и прочих видов растений. Распространены такие пожнивные зеленые удобрения, как узколистый люпин, горох посевной, горох полевой, вика яровая, кормовые бобы, рапс яровой, редька масличная, горчица белая, фацелия.

Осенние зеленые удобрения – это растения, которые высевают осенью, рекомендованы для районов с влажным, затяжным и

теплым осенним периодом и заделываются в почву в тот же сезон.

Посев под зиму – это метод посева сидератов поздней осенью с заделкой ранней весной. Он часто используется в субтропических районах с влажным климатом и мягкой зимой. В степных районах России часто используют озимые зерновые, либо редьку масличную (Колодяжный и др., 2021; Eilittä et al., 2004). Зимние зеленые удобрения могут эффективно расти весной и за период перед посевом основных сельскохозяйственных культур увеличивать зеленую массу до 20 т на га и даже больше. В качестве озимого зеленого удобрения часто используются: вика озимая, рапс озимый, сурепица озимая, озимая рожь.

Уплотненные зеленые удобрения делятся на подсевные и кулисные.

Кулисные сидераты высевают, формируя грядки в виде полос, которые могут иметь различную ширину. Скошенную зеленую часть растений при этом рекомендуется использовать для удобрения соседней полосы-гряды. Поэтому в последние годы в ряде стран (Англия, Германия, США и др.) используют кулисные сидераты (Гасанова и др., 2020; Семененко и др., 2017). В кулисном сидеральном пару стерня и кулисы из горчицы больше влияют на задержание снега и поглощение талой воды. Кукуруза положительно влияет на водный режим и накопление продуктивной влаги. В метровом слое почвы накопление продуктивной влаги увеличилось на 16.0–40.4 мм в среднем за 12 лет (Абрамов, 2020).

Подсевные зеленые удобрения – это метод, когда под покров основной культуры высевают сидераты. Различают два типа посева: подсев под яровую культуру многолетних трав, и посев озимых культур одновременно с подсевом яровой культуры. При наступлении отрицательных температур яровые культуры погибают, затем разлагаются, а питательные вещества при возобновлении вегетации поглощаются озимыми культурами (Новоселов и др., 2022; Новоселов и др., 2017).

Укосное зеленое удобрение производят в выводных полях, а затем транспортируют на участки севооборота и заделывают в почву. Для этой цели используют в основном многолетние сидеральные культуры. Подходит для данных целей и многолетний люпин, который также имеет преимущество в том, что может да-

вать семена даже в условиях северных районов Нечерноземной зоны.

Отавное зеленое удобрение заделывают в землю после отрастания съеденной или удаления с участка скошенной биомассы, а также остатков корней и стеблей сидератов. Оно применяется на посевах с разным типом почв, в первую очередь легкого гранулометрического состава. Используется во всех регионах России, а также в Сибири и на Дальнем Востоке. В качестве отавных зеленых удобрений используют озимый и кормовой горох, чину и донник в Туркменистане, Таджикистане, Узбекистане, Закавказье, Киргизии и Казахстане.

В природе можно встретить множество растений, обладающих свойствами, способными ограничивать количество вредителей и предотвращать возникновение заболеваний. Вырабатываемые этими растениями токсичные вещества функционируют как химические компоненты, участвующие во взаимодействии между различными видами. Данные вещества получили название фитонциды.

Растения, используемые в качестве зеленых удобрений, по фитосанитарному действию на почву и растения также можно поделить на группы:

- защита от сорной растительности (все сидеральные культуры);
- защита от вредителей: большинство вредителей (бархатцы, колорадский жук (лен, календула, бархатцы, фасоль (Лабзина, 2022)), нематода (рожь, люпин, донник, люцерна, подсолнечник, фацелия, райграс, злаковые (Лабзина, 2022; Рудковский и др., 2020)), проволочник (фацелия, донник, горчица, фасоль, бобы, горох (Абашев и др., 2005; Мазаева, 2023; Бобрешова и др., 2021), озимая совка – рапс (Стрельников и др., 2018));
- защита растений от болезней: грибные болезни (капустные растения, люпин, овес, а у донника обнаружено фитонцидное действие на снежную плесень) (Стрельников и др., 2018; Новиков и др., 2015; Новиков и др., 2013; Perria et al., 2022).

Фитонцидное действие на мучнистую росу винограда обнаружено у зеленых удобрений смеси семейств Бобовых, Злаковых,

Капустных и Гидрофильных. Использовалась смесь зеленого удобрения, которая включала семена различных видов семейств Бобовых (55%), Злаковых (38%), Капустных (5%) и Гидрофильных (2%). Эта смесь состояла из вики яровой (30%), бобов (10%), гороха (10%), клевера пунцового (5%), ячменя ярового (16–20%), озимого овса (12–18%), горчицы белой (3%), рукколы (2%), фацели (2%) (Perria et al., 2022).

Вторичные метаболиты растений, которые включают фенольные соединения, терпеноиды, стероиды и алкалоиды, играют ключевую роль в проявлении инсектицидных свойств. Бархатцы содержат такие фитонциды, как алкалоиды и флавоноиды. Эти вещества могут иметь токсическое действие на животный организм (убивать насекомых), а также репеллентное или антифидантное действие (отпугивать вредителей или предотвращать их питание) (Бобрешова и др., 2021).

Сорго, суданка, суданское сорго, также известное как гибрид сорго-суданки (*Sorghum × drummondii*), представляет собой морозоустойчивое растение, отлично адаптированное к условиям засухи. Оно является одним из наиболее эффективных аэрационных растений, использование которого значительно улучшает структуру почвы. Гибрид имеет хорошо развитую корневую систему, активно реагируют на скашивание надземной части увеличением массы вторичных корней.

Выделяя специальные аллелопатические вещества, суданская трава, сорго, суданское сорго эффективно подавляют рост большинства сорняков, очищая и восстанавливая почву. Эти сидераты быстро возвращают плодородие истощенным землям, выполняя свою задачу всего за один год. Они успешно растут на различных типах почв, что делает их идеальными для осушения и реабилитации тяжелых глинистых и влажных участков (Кишев и др., 2024).

ФИТОМЕЛИОРАНТЫ ДЛЯ ЗАСОЛЕННЫХ ПОЧВ ХЕРСОНСКОЙ И ЗАПОРОЖСКОЙ ОБЛАСТЕЙ

Для подбора по классификационному признаку приведем пример фитомелиорантов засоленных почв – культур, пригодных для засушливых условий Херсонской и Запорожской областей.

Это – горчица, амарант, ячмень и донник. По длительности жизненного цикла они относятся к однолетним и двулетним культурам. Семейства также отличаются: Капустные, Амарантовые, Злаковые, Бобовые. По способу выращивания могут быть самостоятельным, промежуточным и уплотненным зеленым удобрением. Как промежуточное удобрение могут быть пожнивной и культурой с осенним сроком посева. В уплотненных посевах могут использоваться как подсевной сидерат (под покров основной культуры), а также как кулисное зеленое удобрение для задержания снежного покрова, и увеличения запаса продуктивной влаги в почве. Являются биологическими мелиорантами и относятся к двум классам – органическим удобрениям и фитомелиорантам. По действию на почву относятся к улучшающим (обогащают ее питательными веществами, в основном фосфором и азотом в легко усвояемой растениями форме, способствуют повышению плодородия почвы за счет повышения количества гумуса), очищающим (способствуют извлечению солей из почвы, снижают запас жизнеспособных семян сорных растений в слое почвы 0–30 см), и защищающим (защищают почву от водной и ветровой эрозии, а также защищают почву от болезней и вредителей). По фитосанитарному действию – защищают почву от таких вредителей, как проволочник, и защищают растения от грибных болезней – мучнистой росы винограда. Горчица предотвращает развитие возбудителя ризоктониоза картофеля благодаря действию специального вещества, выделяемого корнями растений в прикорневую зону. Оздоровливают почву за один вегетационный сезон (Рудковский и др., 2020; Абашев и др., 2005; Мазаева, 2023; Новиков и др., 2015; Perria et al., 2022).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В Херсонской и Запорожской областях России значительные площади пахотных земель подвержены засолению (от 20 до 46%). Для уменьшения антропогенной нагрузки на почву, уменьшения степени засоления почв, сокращения площади пахотных земель подверженных засолению, повышения плодородия и урожайности сельскохозяйственных культур целесообразно использовать фитомелиоранты – горчицу, амарант, ячмень и донник, которые по

классификационным признакам являются улучшающими, очищающими и защищающими зелеными удобрениями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абашев В.Д., Козлова Л.М.* Сидераты в адаптивном земледелии // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2005. № 6. С. 169–178.
2. *Абрамов Н.В.* Формирование водного режима в севооборотах интенсивного типа // Агропродовольственная политика России, 2020. № 1–2. С. 2–8.
3. *Бобрешова И.Ю., Зимина Т.В., Каширских Ю.В.* Растения на страже экологии // Сахарная свекла. 2021. № 6. С. 23–27.
4. *Борисова Е.Е.* Применение сидератов в мире // Вестник НГИЭИ. 2015. № 6 (49). С. 24–33.
5. *Гасанова А.О., Гахраманова Р.Ф.* Роль сидератов в увеличении урожайности хлопчатника и плодородия почвы // Научный журнал “Globus”. 2020. Вып. 7 (53). С. 25–27.
6. *Гришко С.В., Непиша А.В., Непиша Я.Ю. и др.* Гидрогеолого-мелиоративное состояние орошаемых земель Мелитопольского и Акимовского района запорожской области // Актуальные научные исследования в современном мире. 2019. № 10 (54). Ч. 2. С. 6–12.
7. *Гришко С., Непиша О.* Фізико-хімічні властивості ґрунтів Запорізької області. Розвиток сучасної освіти і науки: результати, проблеми, перспективи // Том 6: Проектування суспільних та гуманітарних досліджень. Конін, Ужгород, Перемишль, Херсон: Посвіт, 2021. С. 241–286.
8. *Кишев А.Ю., Битов Х.А., Бжеумыхов В.С.* Влияние сидерации на урожайность полевых культур и продуктивность севооборота // Плодородие. 2024. № 2(137). С. 35–38.
9. *Коваленко Н.П.* Вклад профессора А. Н. Энгельгардта в развитие севооборотов в мировом земледелии второй половины XIX века // Вестник Академии знаний. 2014. № 1 (8). С. 13–18.
10. *Колодяжный А.Г., Карабаев Н.А.* Перспективы внедрения зеленых удобрений на орошаемых землях Кыргызстана // Agronomy Journal. 2021. № 5 (59). С. 8–13.
11. *Лабзина С.* Сидераты для огорода. Самара: ГБУ ДПО “Самара – АРИС”, 2022. 20 с.
12. *Мазаева Ю.В.* Использование сидератов в картофелеводстве // Наука и Образование. 2023. Т. 6. № 2. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_54900459_91021096.pdf.

13. *Макарова Н.М.* Перспективные растения для фитомелиорации засоленных почв // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2021. № 60. С. 129–133.
14. *Новиков М.Н., Фролова Л.Д.* Сидераты как фактор оптимизации использования органических удобрений // Агрохимия. 2015. № 4. С. 44–53.
15. *Новоселов С.И., Еремеев Р.В.* Влияние подсеваемых сидератов на условия питания и урожайность озимой пшеницы // АгроФорум. 2022. № 4. С. 64–65.
16. *Новоселов С.И., Толмачев Н.И., Еремеев Р.В.* Эффективность сидеральных удобрений при возделывании озимой ржи // Вестник Чувашской государственной сельскохозяйственной академии. 2017. № 3 (3). С. 31–35.
17. *Панкова Е.И., Горохова И.Н.* Анализ сведений о площади засоленных почв России на конец XX и начало XXI веков // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2020. Вып. 103. С. 5–33. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-103-5-33>.
18. *Приходько А.В., Караева Н.В., Зубоченко А.А.* Использование тритикале озимой на зеленое удобрение в различные фазы развития растений // Таврический вестник аграрной науки. 2020. № 3 (23). С. 131–141.
19. *Рабинович Г.Ю., Зинковская Т.С., Анциферова О.Н.* Биомелиорация на осушаемых землях // Российская сельскохозяйственная наука. 2021. № 2. С. 3–8.
20. Регіональна доповідь про стан навколишнього природного середовища у Херсонській області у 2016 році. 2017. С. 119–120. URL: https://menr.gov.ua/files/docs/Reg.report/Доповідь_2016_Херсонська.pdf/.
21. *Рудковский Е.Д., Пальчиков Е.В., Новикова Д.А.* Сидераты как органическое удобрение в биологизации земледелия // Наука и Образование. 2020. Т. 3. № 4. С. 164–168.
22. *Семененко Н.Н., Каранкевич Е.В., Авраменко Н.М.* Влияние комплекса агробиотехнологических приемов на продуктивность культур севооборота, эффективность удобрений и плодородие торфяно-минеральных почв Полесья // Почвоведение и агрохимия. 2017. № 1 (58). С. 94–109.
23. *Новиков М.Н., Тамонов А.М., Фролова Л.Д., Ермакова Л.И.* Сидераты в земледелии нечерноземной зоны // Агрохимический вестник. 2013. № 4. С. 20–26.
24. *Панкова Е.И., Горохова И.Н., Конюшкова М.В., Любимова И.Н., Базыкина Г.С.* Современные тренды развития почв солонцовых комплексов на юге степной и в полупустынной зонах в природных

условиях и при антропогенных воздействиях // Экосистемы: экология и динамика. 2019. Т. 3. № 2. С. 44–88.

25. Стрельников Е.А., Горлова Л.А., Бочкарева Э.Б., Трубина В.С. Масличные капустные культуры – перспективный высокоэффективный сидерат // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2018. № 12–1. С. 125–131.

26. Adrian J., Pieters Ph. D. Green manuring. Principles and Practice. New York: John Wiley & Sons, Inc. London: Chapman & Hall, Limited, 1927. 267 p.

27. Arazmjoo E., Moghri Feriz A., Behdani M.A., Mahmoodi S. Evaluation of forage maize yield and soil organic matter content under green manure cultivation // Acta Agriculturae Slovenica. 2022. Vol. 118 (3), P. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.14720/aas.2022.118.3.2194>.

28. Eichler-Löbermann B., Köhne S., Kowalski B., Schnug E. Effect of catch cropping on phosphorus bioavailability in comparison to organic and inorganic fertilization // Journal of Plant Nutrition. 2008. Vol. 31. P. 659–676.

29. Eilittä M., Etëka A., Carsky R.J. Integrating mucuna in the maize-based Systems of Southern Benin // Green manure cover crop systems of smallholder farmers. Kluwer Academic Publishers, 2004. P. 237–261.

30. Global map of salt-affected soils, FAO. 2021. URL: <https://www.fao.org/3/cb7247en/cb7247en.pdf>.

31. Perria R., Ciofini A., Petrucci W. A. A., D’Arcangelo M. E. M., Valentini P., Storchi P., Carella G., Pacetti A., Mugnai L. A study on the efficiency of sustainable wine grape vineyard man-agement strategies // Agronomy. 2022. Vol. 12. 392. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy12020392>.

32. Siwek P., Bucki P., Domagała-Srtekiewicz I., Lalewicz P. Effect of cover crops integration in crop rotation on the yield and chemical composition of edible parts of vegetables grown in an organic system in high tunnel // Scientia Horticulturae. 2024. Vol. 332. 113191. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.113191>.

REFERENCES

1. Abashev V.D., Kozlova L.M. Green manure in adaptive farming, *Agrarian science of the Euro-North-East*, 2005, No. 6, pp. 169–178. (In Russ.)
2. Abramov N.V., Formation of the water regime in intensive crop rotations, *Agro-food policy of Russia*, 2020, No. 1–2, pp. 2–8. (In Russ.)
3. Bobreshova I.Yu., Zimina T.V., Kashirskikh Yu.V., Plants guarding the environment, *Sugar beet*, 2021, No. 6, pp. 23–27. (In Russ.)
4. Borisova E.E., Use of green manure in the world, *Bulletin of NGIEI*, 2015, No. 6 (49), pp. 24–33. (In Russ.)

5. Gasanova A.O., Gakhramanova R.F., The role of green manure in increasing cotton yield and soil fertility, *Scientific journal "Globus"*, 2020, Iss. 7 (53), pp. 25–27. (In Russ.)
6. Grishko S.V., Nepsha A.V., Nepsha Ya.Yu. et al., Hydrogeological and meliorative state of irrigated lands in the Melitopol and Akimov districts of the Zaporizhia region, *Current scientific research in the modern world*, 2019, No. 10 (54), Part 2, pp. 6–12. (In Russ.)
7. Grishko S., Nepsha O., Physical-chemical power of the Zaporizhzhia region. Development of modern education and science: results, problems, prospects, Volume 6: *Project of humanitarian and humanitarian research*, Konin, Uzhgorod, Peremyshl, Kherson: Posvit, 2021, pp. 241–286. (In Russ.)
8. Kishev A.Yu., Bitov Kh.A., Bzheumykhov V.S., The influence of green manure on the yield of field crops and the productivity of crop rotation, *Fertility*, 2024, No. 2(137), pp. 35–38. (In Russ.)
9. Kovalenko N.P., The contribution of Professor A.N. Engelhardt to the development of crop rotations in world agriculture in the second half of the 19th century, *Bulletin of the Academy of Knowledge*, 2014, No. 1 (8), pp. 13–18. (In Russ.)
10. Kolodyazhny A.G., Karabaev N.A., Prospects for the Introduction of Green Manures on Irrigated Lands of Kyrgyzstan, *Agronomy Journal*, 2021, No. 5 (59), pp. 8–13. (In Russ.)
11. Labzina S., *Green manure for the vegetable garden*, Samara: "Samara-ARIS", 2022, 20 p. (In Russ.)
12. Mazaeva Yu.V., Use of green manure in potato growing, *Science and Education*, 2023, Vol. 6, No. 2, URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_54900459_91021096.pdf. (In Russ.)
13. Makarova N.M., Promising plants for phytomelioration of saline soils, *Actual problems of the forest complex*, 2021, No. 60, pp. 129–133. (In Russ.)
14. Novikov M.N., Frolova L.D., Green manure as a factor in optimizing the use of organic fertilizers, *Agrochemistry*, 2015, No. 4, pp. 44–53. (In Russ.)
15. Novoselov S.I., Ereemeev R.V., The influence of undersown green manure on nutrition conditions and winter wheat yield, *AgroForum*, 2022, No. 4, pp. 64–65. (In Russ.)
16. Novoselov S.I., Tolmachev N.I., Ereemeev R.V., Efficiency of green manure fertilizers in winter rye cultivation, *Bulletin of the Chuvash State Agricultural Academy*, 2017, No. 3 (3), pp. 31–35. (In Russ.)
17. Pankova E.I., Gorokhova I.N., Analysis of information about the alkaline soil areas in Russia at the end of the XX and beginning of the XXI centuries, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2020, Vol. 103, pp. 5–33, DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-103-5-33>. (In Russ.)

18. Prikhodko A.V., Karaeva N.V., Zubochenko A.A., Use of winter triticale as green manure at different stages of plant development, *Taurida Herald of the Agrarian Sciences*, 2020, No. 3 (23), pp. 131–141. (In Russ.)
19. Rabinovich G.Yu., Zinkovskaya T.S., Antsiferova O.N., Biomelioration on drained lands, *Russian Agricultural Sciences*, 2021, No. 2, pp. 3–8. (In Russ.)
20. Regional report about the state of excessive natural environment in the Kherson region in 2016, 2017, pp. 119–120. URL: https://menr.gov.ua/files/docs/Reg.report/Dopovid'_2016_Khersons'ka.pdf/. (In Ukr.)
21. Rudkovsky E.D., Palchikov E.V., Novikova D.A., Green manure as an organic fertilizer in the biologization of agriculture, *Science and Education*, 2020, Vol. 3, No. 4, pp. 164–168. (In Russ.)
22. Semenenko N.N., Karankevich E.V., Avramenko N.M., The influence of a complex of agrobiotechnological techniques on the productivity of crop rotation crops, the efficiency of fertilizers and the fertility of peat-mineral soils of Polesia, *Soil Science and Agrochemistry*, 2017, No. 1 (58), pp. 94–109. (In Russ.)
23. Novikov M.N., Tamonov A.M., Frolova L.D., Ermakova L.I., Green manure in agriculture of the non-chernozem zone, *Agrochemical Herald*, 2013, No. 4, pp. 20–26. (In Russ.)
24. Pankova E.I., Gorokhova I.N., Konyushkova M.V., Lyubimova I.N., Bazykina G.S., Modern trends in the development of solonetz complex soils in the south of the steppe and semi-desert zones under natural conditions and under anthropogenic impacts, *Ecosystems: Ecology and Dynamics*, 2019, Vol. 3, No. 2, pp. 44–88. (In Russ.)
25. Strelnikov E.A., Gorlova L.A., Bochkareva E.B., Trubina V.S., Oilseed cabbage crops – a promising highly effective green manure, *International Journal of Humanitarian and Natural Sciences*, 2018, No. 12–1, p. 125–131. (In Russ.)
26. Adrian J., Pieters Ph.D., *Green manuring. Principles and Practice*. New York: John Wiley & Sons, Inc. London: Chapman & Hall, Limited, 1927. 267 p.
27. Arazmjoo E., Moghri Feriz A., Behdani M.A., Mahmoodi S., Evaluation of forage maize yield and soil organic matter content under green manure cultivation, *Acta Agriculturae Slovenica*, 2022, Vol. 118 (3), pp. 1–8, DOI: <https://doi.org/10.14720/aas.2022.118.3.2194>.
28. Eichler-Löbermann B., Köhne S., Kowalski B., Schnug E., Effect of catch cropping on phosphorus bioavailability in comparison to organic and inorganic fertilization, *Journal of Plant Nutrition*, 2008, Vol. 31, pp. 659–676.

29. Eilittä M., Etèka A., Carsky R.J., Integrating mucuna in the maize-based Systems of Southern Benin, In: *Green manure cover crop systems of smallholder farmers*, Kluwer Academic Publishers, 2004, pp. 237–261.
30. Global map of salt-affected soils, FAO, 2021, URL: <https://www.fao.org/3/cb7247en/cb7247en.pdf>.
31. Perria R., Ciofini A., Petrucci W. A. A., D’Arcangelo M. E. M., Valentini P., Storch P., Carella G., Pacetti A., Mugnai L., A study on the efficiency of sustainable wine grape vineyard man-agement strategies, *Agronomy*, 2022, Vol. 12, p. 392, DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy12020392>.
32. Siwek P., Bucki P., Domagała-Siřtkiewicz I., Lalewicz P., Effect of cover crops integration in crop rotation on the yield and chemical composition of edible parts of vegetables grown in an organic system in high tunnel, *Scientia Horticulturae*, 2024, Vol. 332, 113191, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.113191>.

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2026-128-214-240



Ссылки для цитирования:

Сапцын Р.В., Еремченко О.З. Экологическая оценка последствий рекультивации нефтезагрязненной почвы // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2026. Вып. 128. С. 214-240. DOI: 10.19047/0136-1694-2026-128-214-240

Cite this article as:

Saptsyn R.V., Eremchenko P.Z., Ecological assessment of the consequences of reclamation of oil-polluted soil, Dokuchaev Soil Bulletin, 2026, V. 128, pp. 214-240, DOI: 10.19047/0136-1694-2026-128-214-240

Экологическая оценка последствий рекультивации нефтезагрязненной почвы

© 2026 г. Р. В. Сапцын*, О. З. Еремченко**

*Пермский государственный национальный исследовательский
университет**, Россия,
614990, Пермь, ул. Букирева, д. 15,

*<https://orcid.org/0000-0003-3915-0391>, e-mail: ruslansaptsyn@gmail.com,

**<https://orcid.org/0000-0003-3581-0874>, e-mail: eremch@psu.ru.

*Поступила в редакцию 20.06.2024, после доработки 05.02.2026,
принята к публикации 29.04.2026*

Резюме: Рекультивация нарушенных земель направлена на восстановление экологических функций почвы или заменяющих ее техногенных поверхностных образований. В процессе устранения нефтезагрязнения на площади 0.73 га уничтожена темногомусовая почва и сформирован литострат суглинистый карбонатный. Представляет интерес изучение свойств литострата, обеспечивающих выполнение экологических функций. Агрохимические свойства литострата (слабощелочная реакция среды, повышенная обеспеченность подвижными фосфатами, калием, кальцием) указывают на удовлетворительный потенциал к восстановлению травяной экосистемы. Пониженная активность почвенных ферментов (уреазы и инвертазы) связана с недостатком органического вещества в литострате. Установлена фитотоксичность литострата, обусловленная остаточным содержанием нефтепродуктов в количестве 60–140 мг/кг и проявившаяся в физиолого-биохимических показателях тест-культуры. Комплексная

оценка, основанная на расчете коэффициентов оптимизации, показала, что ресурсный (агрохимический) и экологический потенциал поверхностных слоев (0–20 и 20–40 см) литострата уступает темногумусовой почве.

Ключевые слова: нефтезагрязнение; рекультивация; критерии оценивания рекультивации; ферментативная активность; фитотоксичность.

Ecological assessment of the consequences of reclamation of oil-polluted soil

© 2026 R. V. Saptsyn*, O. Z. Eremchenko**

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

*<https://orcid.org/0000-0003-3915-0391>, e-mail: ruslansaptsyn@gmail.com,

**<https://orcid.org/0000-0003-3581-0874>, e-mail: eremch@psu.ru.

Received 20.06.2024, Revised 05.02.2026, Accepted 29.04.2026

Abstract: Reclamation of disturbed lands is aimed at restoring the ecological functions of the soil or man-made surface formations replacing it. In the process of eliminating oil pollution on an area of 0.73 hectares, dark humus soil was destroyed and a loamy carbonate lithostratum was formed. It is of interest to study the properties of the lithostratum, which ensure the fulfillment of environmental functions. The agrochemical properties of the lithostratum (slightly alkaline reaction of the environment, increased supply of mobile phosphates, potassium, calcium) indicate satisfactory potential for the restoration of the grass ecosystem. Reduced activity of soil enzymes (urease and invertase) is associated with a lack of organic matter in the lithostratum. The phytotoxicity of the lithostratum was established, due to the residual content of petroleum products in the amount of 60–140 mg/kg and manifested in the physiological and biochemical parameters of the test culture. A comprehensive assessment based on the calculation of optimization coefficients showed that the resource (agrochemical) and environmental potential of the surface layers (0–20 and 20–40 cm) of the lithostratum is inferior compared to dark humus soil.

Keywords: oil pollution; reclamation; criteria for evaluating reclamation; enzymatic activity; phytotoxicity.

ВВЕДЕНИЕ

Изменение свойств почвы в результате антропогенного воздействия приводит к трансформации экологических и ресурсных функций почвы (Богатырев и др., 2017; Adhikari, Hartemink, 2016; Яковлев, 2022; Яковлева, Евдокимова, 2022). В современном почвенном покрове на разных категориях земель присутствуют искусственные объекты – техногенные поверхностные образования (ТПО) (Классификация и диагностика..., 2004; Тонконогов, 2008; Пастухов, 2013) или техносоли (WRB, 2022). К ТПО относятся литостраты – насыпные минеральные грунты, в том числе, отвалы вскрышных и вмещающих пород горнодобывающих и строительных предприятий, грунтовые насыпи и выровненные грунтовые площадки, созданные при разработке и обустройстве месторождений полезных ископаемых, строительстве городов и поселков. Литостраты являются новой средой обитания живых организмов, выполняющей биогеоценотические функции почвы. Потенциальная способность литострата к созданию условий обитания растений зависит от свойств минерального субстрата, в первую очередь, от гранулометрического состава и водопроницаемости, а также от специфичности химических свойств (Gracheva, 2019).

В настоящее время значительные площади суши затронуты разливами нефти; под воздействием нефтепродуктов происходит глубокое изменение свойств и нарушение экологических функций почв (Хазиев и др., 1988; Исмаилов, 1988; Киреева и др., 2009; Kimes et al., 2014; Riveroll-Larios et al., 2015; Polyak et al., 2018; Тишин, 2020). На территории Пермского края ведется добыча и транспортировка нефти, периодически случаются нефтяные разливы, которые устраняют преимущественно путем удаления загрязненной растительности и верхней части почвы для последующей ремедиации в специализированных организациях. Такой способ решения проблемы, с одной стороны, устраняет токсическое воздействие нефтепродуктов на окружающую среду, но, с другой стороны, ликвидирует некоторую часть профиля почвы, снижая ее плодородие и потенциал к восстановлению экосистемы.

Цель исследований – на основе данных об агрохимических и биологических свойствах почвы, рекультивированной после

нефтезагрязнения, оценить ее способность к выполнению основных экологических и ресурсных функций.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Ранней весной 2018 г. из-за разгерметизации нефтепровода произошел аварийный разлив нефти и загрязнение почвенно-растительного покрова. Нефтезагрязненный участок расположен на территории Лобановского сельского поселения в Пермском районе Пермского края, относится к категории земель населенных пунктов. На этапе технической рекультивации удалили растительность и часть загрязненной почвы для последующей ремедиации в специализированной организации. Рельеф территории восстановили путем отсыпки на поверхность суглинистого грунта, который применяется для создания насыпей возле автомобильных дорог. Рекультивированная территория занимает около 0.73 га, рельеф понижено-равнинный со слабым уклоном на юго-запад, почвообразующими породами служат элювиально-делювиальные суглинки.

В течение 2018–2019 гг. проводили контроль над содержанием остаточных нефтепродуктов в слое почвы 0–20 см в 5–7 точках исследуемого участка.

В июле 2022 г. в центре рекультивированного участка заложили полуразрез для морфологического описания и диагностики почвы. Почвенные пробы отобрали в 7 точках участка по слоям 0–20 и 20–40 см (рис. 1). На расстоянии около 100 м от рекультивированной территории выбран контрольный участок для диагностики фоновой почвы. В пределах контрольного участка взяли почвенные пробы по глубинам 0–20 см и 20–40 см в 3-кратной повторности. Координаты разреза фоновой почвы (в системе координат WGS-84): N 57°47'9.33"; E 56°22'56.37".

В связи с результатами ранее проведенных исследований (Сапцын, Еремченко, 2023) изучили почвенные свойства, изменяющиеся в процессе разрушения нефтяных углеводородов:

- содержание остаточных нефтепродуктов – гравиметрическим методом (ПНД Ф 16.1.41-04);



Рис. 1. Карта отбора почвенных проб.

Fig. 1. Map of soil sampling.

- рН водной и солевой вытяжки – потенциметрическим методом по ГОСТ 26423-85 и ГОСТ 26483-85;
- органическое вещество (C_{org}) – титриметрическим методом по Тюрину;
- подвижные соединения фосфора и калия в фоновой почве – по Кирсанову (ГОСТ Р 54650—2011), в рекультивированной почве – по Мачигину (ГОСТ 26205-91);
- активность каталазы – по методу Джонсона и Темпла путем обратного титрования остаточного H_2O_2 с $KMnO_4$;
- активность уреазы и инвертазы – по методам Ф.Х. Хазиева (2005);
- фитотестирование почвы проводили по реакции кресс-салата, высоту и сырую массу надземной части растений измерили в 25-кратной повторности (Патент РФ № 2620555..., 2017);

- редокс-активность растительных вытяжек из кресс-салата изучали по методу Петта в модификации Прокашева; в условиях окислительного стресса растения накапливают восстановленные соединения (Патент РФ № 2620555..., 2017).

Результаты исследований обработаны математически с использованием программного обеспечения Statistica (версия 10). Значимые различия рассчитали методом дисперсионного анализа с помощью критерия Краскела–Уолиса и уровнем значимости $P < 0.05$. Адекватность полученных уравнений регрессии рассчитали с помощью критерия Фишера при уровне значимости $P < 0.05$.

Для комплексной оценки почв использовали метод математической оптимизации, при котором для каждого показателя свойств почвы выбирали экстремум (оптимальный минимум или максимум), относительно которого рассчитали нормированные показатели. Путем сложения нормированных показателей получили коэффициенты оптимизации почв.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На контрольном участке с фоновой почвой растительность представлена разнотравно-злаковой ассоциацией. В профиле почвы диагностировали следующие генетические горизонты (рис. 2.).

AУ1 – темногомусовый, мощность 0–20/20 см, темносерый с бурым оттенком, зернисто-комковатый, среднесуглинистый, рыхлый, много корней трав.

AУ2 – темногомусовый переходный, мощность 20–45/25 см, серо-бурый, среднекомковатый, среднесуглинистый, слегка уплотненный, присутствуют корневины, копролиты, корни трав.

AУС – переходный к породе горизонт, мощность 45–70/25 см, бурый, непрочно комковатый, суглинистый, слегка уплотненный, слегка вязкий, присутствуют червоточины и корневины, есть корни; очень постепенно переходит в почвообразующую породу.

С – почвообразующая порода с глубины около 70 см, бурая, бесструктурная, тяжелосуглинистая, уплотненная, слегка вязкая.

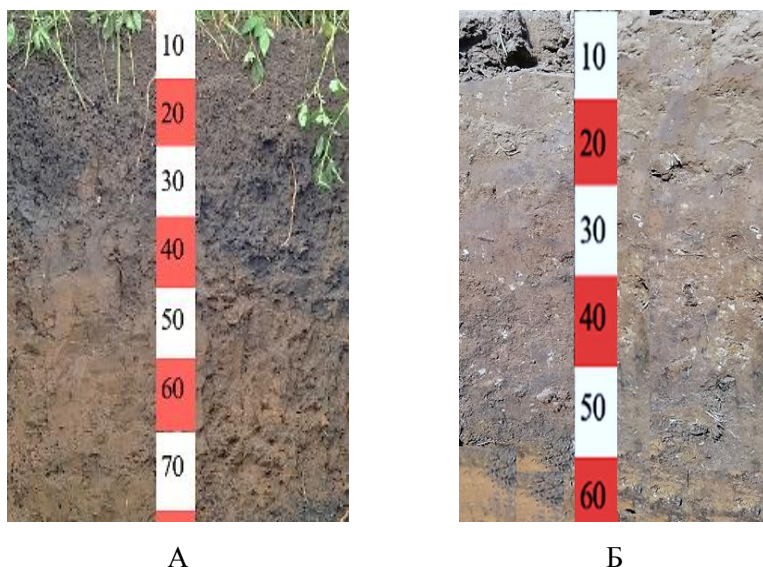


Рис. 2. Серогумусовая почва (А) и литострат карбонатный (Б).
Fig. 2. Appearance of gray humus soil (А) and carbonate lithostrate (Б).

В соответствии с классификацией почв России (Классификация и диагностика..., 2004), почва диагностирована как темно-гумусовая маломощная, сильно гумусированная по содержанию гумуса (табл. 1).

На рекультивированном участке растительность представлена луговыми и сорными видами трав. Профиль “почвы” характеризовался следующими морфологическими особенностями (рис. 2).

Слой мощностью 0–50(55) см – отсыпанный грунт, буровато-серый со светло-палевыми пятнами карбонатных включений, с глубины около 45 см неоднородной окраски: буровато-серые и бурые фрагменты, бесструктурный, среднесуглинистый, уплотненный, есть корни трав, “вскипает от HCl”.

АУС – с глубины около 55 см залегает нижняя часть переходного горизонта, цвет бурый, слабовыраженная комковатость, уплотненный, слегка вязкий, редко встречались корни; очень по-

степенно переходит в почвообразующую породу – бурые элювиально-делювиальные суглинки.

Таблица 1. Агрохимические свойства темногомусовой почвы и литострата (средние и их стандартные ошибки)

Table 1. Agrochemical properties of dark-humus soil and lithostrate (means and their standard deviations)

Объект	Слой, см	$pH_{вод}$	$C_{орг}$, %	Подвижные формы, мг/100 г		Нефтепродукты, г/кг
				P_2O_5	K	
Почва	0–20	6.69 ± 0.21	4.37 ± 0.25	11.3 ± 2.2	4.6 ± 1.2	нет
	20–40	6.77 ± 0.25	3.82 ± 0.18	7.8 ± 1.8	5.2 ± 1.4	нет
Литострат	0–20	$7.66^* \pm 0.04$	$1.59^* \pm 0.20$	$7.5^* \pm 1.3$	$15.6^* \pm 0.7$	0.11 ± 0.01
	20–40	$7.76^* \pm 0.04$	$1.25^* \pm 0.24$	6.9 ± 0.9	$15.4^* \pm 1.4$	0.09 ± 0.01

Примечание. *– наличие значимых различий между свойствами почвы и литострата, значимость различий рассчитана с помощью критерия Краскела–Уолиса при уровне значимости $P < 0.05$.

Note. *– the presence of significant differences between the properties of soil and lithostrate, the significance of the differences was calculated using the Kruskal–Wallis test at a significance level of $P < 0.05$.

Таким образом, по результатам морфологического описания почв установлено, что в процессе технической рекультивации среза-ли верхнюю часть темногомусовой почвы; на остаточную часть профиля насыпали грунт суглинистого гранулометрического состава слоем около 50–55 см, содержащий карбонатные включения. Исследуемое техногенное поверхностное образование является литостратом суглинистым карбонатным, сформированным на нижней части профиля темногомусовой почвы.

Летом 2018 г. в верхнем слое (0–20 см) литострата содержание остаточных нефтепродуктов составило в среднем около 1.5 г/кг (рис. 3). В апреле 2019 г. их количество уменьшилось в 5

раз; в июле этого же года наблюдали дополнительное уменьшение содержания нефтепродуктов в 2.5 раза. Через 2 года (2022) не отмечено значимых изменений в нефтезагрязнении литострата. Часть нефтепродуктов малодоступна для биodeградации, поэтому углеводороды не могут быть полностью удалены из почв даже в течение длительного времени (Stroud et al., 2007).

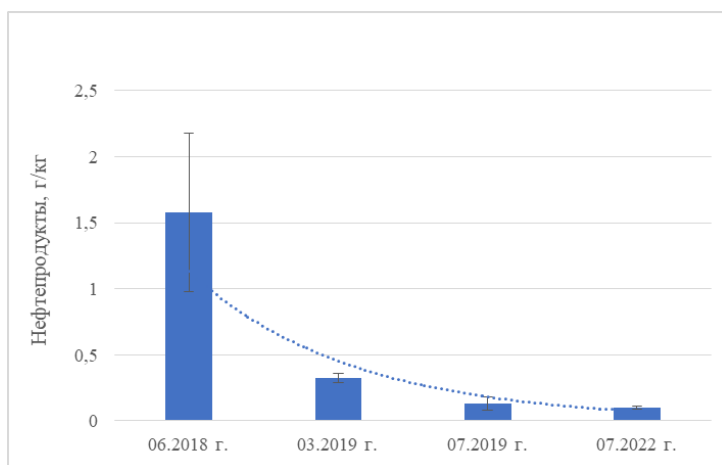


Рис. 3. Динамика содержания нефтепродуктов в слое литострата 0–20 см
Fig. 3. Dynamics of oil product content in the 0–20 cm lithostrate layer.

После проведения технической рекультивации и естественного самоочищения в течение 4 лет остаточное содержание нефтепродуктов в литострате находилось в пределах 0.06–0.14 г/100 г (табл. 1); между их содержанием в слоях 0–20 и 20–40 см не установлено значимых различий. Количество нефтепродуктов в литострате на порядок ниже регионального норматива допустимого содержания нефтепродуктов для зональной дерново-подзолистой почвы, который на землях сельскохозяйственного назначения составляет 2.4 г/кг (Постановление Правительства..., 2018).

Актуальная реакция почвенной среды в темногумусовой почве близка к нейтральной. По количеству гумуса почва отно-

сится к виду сильно гумусированных почв (Классификация и диагностика..., 2004). Согласно шкале В.Ф. Валькова с соавторами (2004), содержание в почве подвижных фосфатов соответствует повышенному уровню, подвижного калия – среднему уровню.

Для литострата характерна слабощелочная реакция почвенной среды, обусловленная присутствием карбонатов в строительном грунте. Количество органического углерода в среднем ниже в 3 раза, чем в темногомусовой почве. В соответствии с принятой градацией (Классификация и диагностика..., 2004) литострат характеризовался низким содержанием гумуса. В то же время литострат обогащен подвижными фосфатами и калием; по шкале обеспеченности (Вальков и др., 2004) уровень содержания фосфатов оценили как очень высокий, а калия – повышенный и высокий.

Известно, что чувствительными к антропогенному воздействию являются показатели отклика микробного сообщества почв (Терехова и др., 2021). Почвенные ферменты продуцируются прежде всего микроорганизмами, поэтому показатели ферментативной активности часто используют при оценке степени нарушения свойств и функций почвы (Zhao, Jiang, 2010; Liu et al., 2011; Soldatkin et al., 2012; Богатырев и др., 2017; Polyak et al., 2018). Каталазу и уреазу отнесли к ферментам, которые признаны маркерными в мониторинге углеводородного загрязнения (Maila, Cloete, 2005; Wu et al., 2016; Polyak et al., 2018).

Разрушение углеводов микроорганизмами приводит к образованию избыточного количества H_2O_2 , повреждающего клетки (Polyak et al., 2018). Каталаза метаболизирует H_2O_2 и защищает микробные клетки от повреждения, ее продуцируют практически все аэробные организмы (Stpniewska et al., 2009). По активности каталазы оценивают экологическое состояние не только загрязненных, но и других антропогенно-измененных почв (Garcia-Gil et al., 2000; Shi et al., 2008; Papa et al., 2009). При повышении концентрации нефтепродуктов в дерново-подзолистой супесчаной почве отметили ингибирование каталазной активности (Курбатов и др., 2019). В наших исследованиях каталазная активность в фоновой почве и литострате относительно одинаковая (табл. 2), что, вероятно, указывает на близкие уровни активности аэробных микроорганизмов.

Темногумусовая почва характеризовалась средней обеспеченностью инвертазой, а литострат – низкой обеспеченностью по шкале Д.Г. Звягинцева (1978). Активность инвертазы в темногумусовой почве в несколько раз выше, что указывает на более интенсивные, чем в литострате, процессы расщепления углеводов (Звягинцев, 1978; Frankeberger, Johanson, 1983).

Таблица 2. Ферментативная активность темногумусовой почвы и литострата (средние и их стандартные ошибки)

Table 2. Biochemical properties of dark-humus soil and lithostrate (means and their standard errors)

Объект	Слой, см	Каталаза, мл 0.1 н KMnO_4 * 1 г * 20 мин	Уреаза, мг N-NH_4 * 1 г * 24 ч	Инвертаза, мг глюкозы * 1 г * 24 ч
Почва	0–20	1.28 ± 0.02	2.9 ± 0.1	25.2 ± 2.2
	20–40	1.26 ± 0.01	0.6 ± 0.1	28.1 ± 0.8
Лито-страт	0–20	1.27 ± 0.01	$1.3^* \pm 0.2$	$9.5^* \pm 0.5$
	20–40	1.27 ± 0.01	$1.6^* \pm 0.2$	$9.3^* \pm 0.4$

Примечание. * – наличие значимых различий между свойствами почвы и литострата, значимость различий рассчитана с помощью критерия Краскела–Уолиса при уровне значимости $P < 0.05$.

Note. * – the presence of significant differences between the properties of soil and lithostrate, the significance of the differences was calculated using the Kruskal–Wallis test at a significance level of $P < 0.05$.

Уреаза в почвах катализирует гидролиз мочевины (Звягинцев, 1978; Щербакова, 1983; Косак, 2020). В подзолистой почве активность уреазы напрямую не коррелировала с деградацией нефти (Polyak et al., 2018). В слое 0–20 см темногумусовой почвы и в слоях 0–20 и 20–40 см литострата наблюдали среднюю обеспеченность уреазой, но в слое почвы 20–40 см обеспеченность ферментом низкая (по: Звягинцев, 1978). Одновременно в верхней части темногумусового горизонта почвы уреазная активность выше в 2 раза, по сравнению с ее активностью в верхнем слое литострата. Активность уреазы соответствует численности важнейшей группы аммонифицирующих микроорганизмов, принимающих

участие в минерализации азотсодержащих органических соединений (Исмаилов, 1988; Хазиев и др., 1988). Следовательно, уровень активности уреазы в литострате указывает на пониженную численность аммонифицирующих микроорганизмов и обедненность азотсодержащими органическими соединениями. В слое 20–40 см темногомусового горизонта почвы активность уреазы существенно снизилась и оказалась ниже, чем в этом слое литострата.

Таким образом, литостат карбонатный хорошо обеспечен подвижными соединениями фосфора, калия и кальция (карбонатов), но в нем мало органического вещества и понижена активность уреазы и инвертазы, по сравнению с фоновой темногомусовой почвой.

Верхний (0–20 см) и нижний (20–40 см) слои литострата не отличались по исследуемым агрохимическим и биохимическим свойствам (при уровне значимости $P < 0.05$), что связано с гомогенностью отсыпанного грунта и малой продолжительностью периода для развития признаков начального почвообразования. В условиях гумидного климата для формирования маломощных почв из ТПО потребовалось несколько десятилетий; в основе механизма формирования “эмбриозема” находится трансформация свежего органического вещества при участии микроорганизмов (Пастухов, 2013).

Для оценки экологического состояния нарушенных почв одним из наиболее информативных показателей является реакция высших растений (Терехова, 2022). Результаты фитотестирования литострата подтвердили ранее полученные нами данные об ответной реакции кресс-салата на нефтезагрязнение (Еремченко и др., 2022; Сапцын, Еремченко, 2023). Относительно невысокое содержание остаточных нефтепродуктов (60–140 мг/кг) отрицательно повлияло на длину и массу растений кресс-салата (рис. 4). Согласно уравнению регрессии, адекватному полученным данным, при наименьшем загрязнении нефтепродуктами (60 мг/кг почвы) надземная масса растений кресс-салата составляла 22.6 мг, а при загрязнении 140 мг/кг почвы масса снижалась на 19%, – до 18.3 мг. Токсичность остаточных нефтепродуктов может быть обусловлена прямым воздействием на биоту, а также косвенным – через ухудшение водно-физических, воздушных и других свойств

почвы (Хазиев и др., 1988; Исмаилов, 1988; Киреева и др., 2009; Тишин, 2020).

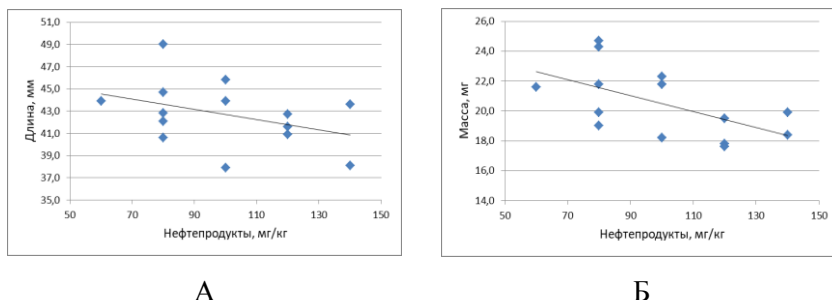


Рис. 4. Влияние остаточных нефтепродуктов в литострате на длину (А) кресс-салата ($y = 47.3 - 0.046x$; критерий Фишера $F = 2.17$; коэффициент корреляции $R = -0.39$; уровень значимости $P = 0.0484$) и массу (Б) растений ($y = 25.8 - 0.053x$; $F = 5.92$; $R = -0.58$; $P = 0.0001$).

Fig. 4. The influence of residual oil products in the lithostrate on the length (А) of watercress ($y = 47.3 - 0.046x$; Fisher test $F = 2.17$; correlation coefficient $R = -0.39$; significance level $P = 0.0484$) and (Б) plants weight ($y = 25.8 - 0.053x$; $F = 5.92$; $R = -0.58$; $P = 0.0001$).

Статистически значимых зависимостей между свойствами литострата и количеством остаточных нефтепродуктов, а также между содержанием остаточных нефтепродуктов и ферментативной активностью не установлено.

Внутри каждого поля существует более или менее выраженная неоднородность физических, химических и агрохимических свойств почвы (Важенин и др., 1961; Robert, 2002; Вальков и др., 2004). Информация о внутренней структуре почвенного покрова конкретного угодья востребована при внедрении технологий точного земледелия (Robert, 2002; Шпаар и др., 2009; Денисов и др., 2016). Для характеристики изучаемого свойства почв, кроме среднего значения, крайне важна оценка пространственного варьирования показателя. Простым индикатором изменчивости почвенных свойств служит коэффициент вариации (Дмитриев, 1995; Вальков и др., 2004; Gurevitch, Larty, 2001; Вальков и др., 2004; Oldfield et al., 2019; Самсонова, Мешалкина, 2020). В нашем слу-

чае степень однородности свойств отсыпанного при рекультивации грунта определяет биологический потенциал восстановления экосистемы на рекультивированном участке.

Коэффициенты вариации агрохимических и биохимических свойств на обследованной территории находились в диапазоне 1–52% (рис. 5).

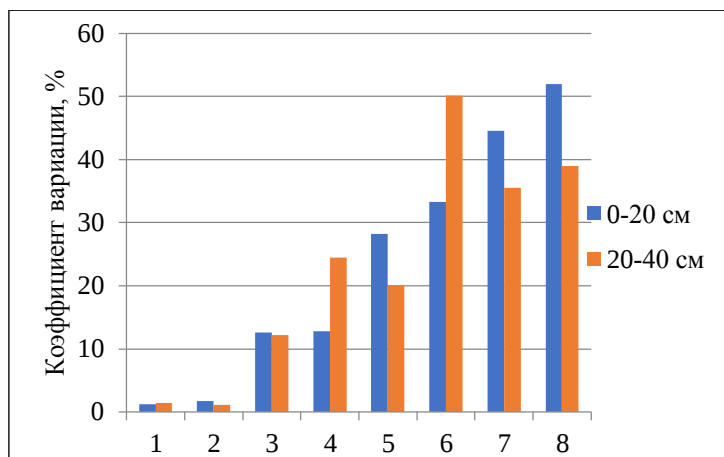


Рис. 5. Коэффициенты вариации агрохимических и биохимических свойств литострата: 1 – $pH_{\text{вод}}$, 2 – активность каталазы, 3 – активность инвертазы, 4 – содержание подвижного калия, 5 – содержание нефтепродуктов, 6 – содержание органического углерода, 7 – содержание подвижных фосфатов, 8 – активность уреазы.

Fig. 5. Coefficients of variation of agrochemical and biochemical properties of lithostrate: 1 – pH_{water} , 2 – catalase activity, 3 – invertase activity, 4 – content of mobile potassium, 5 – content of petroleum products, 6 – content of organic carbon, 7 – content of mobile phosphates, 8 – urease activity.

По степени относительной изменчивости внутри участка агрохимические показатели в слое 0–20 см составили ряд: $pH < K < C_{\text{орг}} < P_2O_5$. В слое 20–40 см варьирование содержания органического углерода оказалось выше, чем у подвижных фосфатов: $pH < K < P_2O_5 < C_{\text{орг}}$. Ранжирование агрохимических свойств литострата по степени варьирования в целом соответствует ранее проведен-

ному ранжированию свойств дерново-подзолистых почв (Самсонова, 2008; Самсонова и др., 2017), а также почв юга России (Вальков и др., 2004). Ученые отмечали, что реакция почвенной среды относится к группе инвариантных свойств, в группу наиболее изменчивых свойств входят подвижные фосфаты. Среднее положение по величине коэффициентов вариации, как правило, занимает варьирование гумуса и обменного калия.

В пределах рекультивированного участка установлены различия в изменчивости активности почвенных ферментов (рис. 4). Каталазная активность литострата в слоях 0–40 см и в границах рекультивированного участка оказалась самым инвариантным показателем, что указывает, по всей вероятности, на однородность условий обитания аэробных микроорганизмов, продуцирующих каталазу (Stpniewska et al., 2009).

Отмечена относительно низкая изменчивость (коэффициенты вариации около 12%) инвертазной активности в обоих слоях литострата, что, по-видимому, отражает одинаковую интенсивность процессов микробного расщепления углеводов, в которых участвует инвертаза (Звягинцев, 1978; Frankeberger, Johanson, 1983).

Повышенной изменчивостью в литострате отличилась урезная активность, особенно, в слое 0–20 см. Значительная варибельность этого важнейшего участника азотного обмена проявилась на фоне низкого содержания органического вещества (см. табл. 1), судя по всему, связана с общей обедненностью литострата азотсодержащими соединениями.

При комплексной оценке нефтезагрязненных почв применяют интегральные показатели биологической активности и/или индекса фитотоксичности (Киреева и др., 2001; Девятова, 2005; Шарапова и др., 2015). Способность литострата реализовать экологические функции почвы оценили по совокупности агрохимических (ресурсных) и биологических (биохимических и фитопригодных) свойств; для этого применили метод математической оптимизации, ранее использованный нами для оценки состояния нефтезагрязненных почв (Баландина, Еремченко, 2018; Сапцын, Еремченко, 2023).

Из выборки полученных данных по свойствам почвы и литострата ($x_1, x_2, x_3, x_4, \dots x_n$) выбрали оптимум – минимальное ($x_{\min}$) или максимальное ($x_{\max}$) значение. В качестве оптимума для показателей длины, массы тест-культуры, подвижных фосфатов и калия, активности ферментов использованы максимальные значения ($x_{\max}$). В качестве оптимального pH выбрали значение наиболее близкое к нейтральной реакции почвенной среды (pH 7). В качестве оптимума для редокс-активности кресс-салата взяли минимальный показатель ($x_{\min}$), потому что на нефтезагрязнение растения отвечали накоплением соединений с восстановительной активностью (Киреева и др., 2009; Еремченко, Митракова, 2017; Сапцын, Еремченко, 2023). Относительно оптимума рассчитали нормированные показатели: $x_k = x_{\min} / x_n$, или $x_k = x_n / x_{\max}$. Путем сложения нормированных показателей (x_k) получили критерий оптимизации для фоновой почвы и каждого опробования литострата (табл. 3, 4). При данном формализованном подходе учитывался комплекс экологически важных свойств. Согласно А.С. Яковлеву (2022) при оптимальном состоянии почвы достигается максимально возможная реализация экологических функций, следовательно, по размерности коэффициента оптимизации можно оценить экологический потенциал нарушенной почвы (литострата).

Максимальный коэффициент оптимизации свойств установили для верхней части темного гумусового горизонта почвы, в котором самые высокие нормированные показатели органического углерода, обеспеченности фосфатами и ферментативной активности. Коэффициенты оптимизации литострата в слое 0–20 см ниже на 4–25%, а в слое 20–40 см ниже на 1–14%, по сравнению с коэффициентами оптимизации соответствующих слоев темного гумусового горизонта (табл. 3, 4).

Литострат характеризовался повышенной пригодностью для выращивания тест-культуры, на что указывали более высокие нормированные показатели высоты и массы кресс-салата. Развитию кресс-салата на литострате благоприятствовали отсутствие кислотности, обеспеченность фосфатами, калием, кальцием.

Таблица 3. Нормированные показатели и коэффициенты оптимизации свойств темногогумусовой почвы и литострата в слое 0–20 см

Table 3. Normalized indicators and coefficients for optimizing the properties of dark-humus soil and lithostratum by layer 0–20 cm

Показатели		Почва	Литострат						
			№ пробы						
			1	2	3	4	5	6	7
рН _{вод}		0.93	0.97	0.94	0.95	0.95	0.94	0.93	0.95
С _{орг} , %		1	0.08	0.32	0.30	0.58	0.59	0.27	0.43
Подвижные	P ₂ O ₅	1	0.90	0.14	0.72	0.83	0.88	0.64	0.70
	K	0.24	0.83	0.86	0.89	0.80	0.86	0.58	0.80
Активность	каталазы	0.99	0.96	0.99	0.99	0.96	1	1	0.98
	уреазы	1	0.19	0.23	0.52	0.41	0.56	0.29	0.89
	инвертазы	1	0.34	0.33	0.40	0.27	0.36	0.30	0.35
Тест-культура	длина	0.67	0.90	0.78	0.77	0.89	0.89	0.91	0.85
	масса	0.64	0.88	0.75	0.74	0.88	0.81	0.88	0.72
	редокс-активность	0.87	0.64	0.94	0.85	1	0.70	0.91	0.55
Коэффициент оптимизации		8.91	7.22	6.65	7.67	8.51	7.95	7.52	7.67

Таблица 4. Нормированные показатели и коэффициенты оптимизации свойств темногогумусовой почвы и литострата в слое 20–40 см

Table 4. Normalized indicators and coefficients for optimizing the properties of dark-humus soil and lithostratum by layer 20–40 cm

Показатели		Почва	Литострат						
			№ пробы						
			1	2	3	4	5	6	7
pH _{вод}		1	0.96	0.94	0.92	0.93	0.93	0.92	0.94
C _{орг} , %		0.97	0.32	0.25	0.21	0.47	0.56	0.33	0.31
Подвижные	P ₂ O ₅	0.69	0.61	0.05	0.64	0.77	0.74	0.57	0.74
	K	0.27	0.80	1	0.69	0.72	0.91	0.44	0.97
Активность	каталазы	0.98	0.98	1	0.99	0.97	0.99	0.98	0.98
	уреазы	0.22	0.68	0.70	0.67	0.81	0.39	0.24	0.41
	инвертазы	0.89	0.35	0.32	0.37	0.33	0.31	0.25	0.36
Тест-культура	длина	0.62	0.86	0.87	0.83	0.87	0.84	1	0.93
	масса	0.54	0.86	0.81	0.77	0.79	0.71	1	0.91
	редокс-активность	0.95	0.77	0.85	0.79	0.55	0.94	0.79	0.68
Коэффициент оптимизации		8.91	7.96	7.89	7.48	7.58	6.84	7.77	7.21

Одновременно пониженные нормированные коэффициенты и, соответственно, повышенные значения редокс-активности кресс-салата наблюдали при выращивании на некоторых пробах из слоя 0–20 см литострата (табл. 3) и почти на всех пробах из слоя 20–40 см (табл. 4).

Вероятно, аккумуляция соединений с восстановленной активностью в листьях тест-культуры связана с присутствием остаточных нефтепродуктов в литострате; так, усиление нефтезагрязненности дерново-подзолистой почвы сопровождалось окислительным стрессом и повышением редокс-активности кресс-салата (Сапцын, Еремченко, 2023).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате технической рекультивации нефтезагрязненная темногомусовая почва была уничтожена до глубины около 60 см. На рекультивированном участке площадью около 0.73 га путем отсыпки суглинистого карбонатного грунта слоем около полуметра сформирован литострат карбонатный, характеризующийся относительной однородностью агрохимических и биохимических свойств.

Согласно комплексной оценке (на основе расчетных коэффициентов оптимизации свойств) ресурсный и экологический потенциал поверхностного слоя литострата мощностью 0–40 см уступает фоновой темногомусовой почве. С остаточным содержанием нефтепродуктов в количестве 60–140 мг/кг связана некоторая фитотоксичность литострата, проявившаяся в физиолого-биохимических показателях тест-культуры. Низкая активность почвенных ферментов (уреазы и инвертазы) обусловлена недостатком органического вещества в литострате. Агрохимические свойства литострата (слабощелочная реакция среды, повышенная обеспеченность подвижными фосфатами, калием, кальцием) указывали на удовлетворительный потенциал к восстановлению травяной экосистемы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баландина А.В., Еремченко О.З. Динамика численности микроорганизмов в нефтезагрязненной дерново-карбонатной почве в

- процессе ремедиации // Вестник Пермского университета. Серия: Биология. 2018. № 3. С. 301–307. DOI: <https://doi.org/10.17072/1994-9952-2018-3-301-307>.
2. *Важенин И.Г., Музычкин Е.Т., Прохорова З.А., Алешина Т.Н.* О методике составления крупномасштабных почвенно-агрохимических картограмм в целях применения удобрений // Почвоведение. 1961. № 4. С. 1–13.
3. *Вальков В.Ф., Елисеева Н.В., Имгрунт И.И., Казеев К.Ш., Колесников С.И.* Справочник по оценке почв. Майкоп: ГУРИПП “Адыгея”, 2004. 236 с.
4. *Девятова Т.А.* Биологические принципы мониторинга и диагностики загрязнения почв // Вестник ВГУ. Серия: Химия. Биология. Фармация. 2005. № 1. С. 105–106.
5. *Денисов К.Е., Петров К.А., Григорьев Н.С.* Повышение экономической эффективности растениеводства на основе дифференцированного внесения удобрений в системе точного земледелия // Наука вчера, сегодня, завтра. 2016. № 5-2. С. 72–76.
6. *Еремченко О.З., Сапцын Р.В., Ложкина Е.А., Тыршу Е.В.* Оценка эффективности рекультивации нефтезагрязненных почв // Вестник Пермского университета. Серия: Биология. 2022. № 1. С. 64–71. DOI: <https://doi.org/10.17072/1994-9952-2022-1-64-71>.
7. *Звягинцев Д.Г.* Биологическая активность почв и шкалы для оценки некоторых ее показателей // Почвоведение. 1978. № 6. С. 48–54.
8. *Исмаилов Н.М.* Микробиология и ферментативная активность нефтезагрязнённых почв // Восстановление нефтезагрязненных почвенных экосистем. М.: Наука, 1988. С. 42–57.
9. *Киреева Н.А., Водопьянов В.В., Мифтахова А.М.* Биологическая активность нефтезагрязнённых почв. Уфа: Гилем, 2001. 376 с.
10. *Киреева Н.А., Новоселова Е.И., Григориади А.С.* Влияние загрязнения почв нефтью на физиологические показатели растений и ризосферную микробиоту // Агрохимия. 2009. № 7. С. 71–80.
11. Классификация и диагностика почв России / Под ред. *Добровольского Г.В.* Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
12. *Курбатов Ю.Н., Скрипченко Л.С., Трифонова Т.А.* Исследование влияния нефтяного загрязнения на каталазную активность почвы // Проблемы экологического образования в XXI веке. 2019. С. 308–313.
13. Об утверждении Порядка и мер охраны редких и находящихся под угрозой исчезновения почв, занесенных в Красную книгу почв Пермского края, перечня редких и находящихся под угрозой исчезновения почв, занесенных в Красную книгу почв Пермского края:

Постановление Правительства Пермского края № 447-п (утв. Губернатором Пермского края 27.05.2022.

14. *Пастухов А.В.* Проблемы классификации и диагностики техногенных почв при составлении крупномасштабных карт // Теоретическая и прикладная экология. 2013. № 2. С. 74–80.

15. Патент РФ № 2620555. Способ оценки биологической активности и токсичности почв и техногенных почвогрунтов / *О.З. Еремченко, Н.В. Митракова*. По заявке № 2016113050. Оpubл. 26.05. 2017.

16. *Самсонова В.П.* Пространственная изменчивость почвенных свойств на примере дерново-подзолистых почв. М.: Изд-во “ЛКИ”, 2008. 156 с.

17. *Самсонова В.П., Кротов Д.Г., Лавринова Е.Ю.* Пространственная изменчивость агрохимических свойств сельскохозяйственных угодий Брянской области // Агрохимия. 2017. № 7. С. 11–18.

18. *Самсонова В.П., Мешалкина Ю.Л.* Часто встречающиеся неточности и ошибки применения статистических методов в почвоведении // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2020. Вып. 102. С. 164–182. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-102-164-182>.

19. *Сапцын Р.В., Еремченко О.З.* Индикаторы эколого-биологического состояния нефтезагрязненной дерново-подзолистой почвы // АгроЭкоИнфо: Электронный научно-производственный журнал. 2023. № 4. DOI: <https://doi.org/10.51419/202134410>.

20. *Терехова В.А.* Биотестирование экотоксичности почв при химическом загрязнении: современные подходы к интеграции для оценки экологического состояния (обзор) // Почвоведение. 2022. № 5. С. 586–599. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0032180X220500>.

21. *Терехова В.А., Прудникова Е.В., Кулачкова С.А., Горленко М.В., Учанов П.В., Сушко С.В., Ананьева Н.Д.* Микробиологические показатели агродерново-подзолистых почв разной гумусированности при внесении тяжелых металлов и углеродсодержащих препаратов // Почвоведение. 2021. № 3. С. 372–384.

22. *Тишин А.С.* Фитотестирование почв, загрязненных нефтепродуктами // Международный научно-исследовательский журнал. 2020. № 12 (102). Ч. 2. С. 78–83.

23. *Тонконогов В.Д.* Первая русская версия мировой коррелятивной базы почвенных ресурсов (WRB) // Почвоведение. 2008. № 6. С. 751–754.

24. *Хазиев Ф.Х.* Методы почвенной энзимологии. М.: Наука, 2005. 252 с.

25. *Хазиев Ф.Х., Тишкина Е.И., Киреева Н.А., Кузяхметов Г.Г.* Влияние нефтяного загрязнения на некоторые компоненты агроэкосистемы // Агрохимия. 1988. № 2. С. 56–61.

26. *Шарапова И.Э., Лантева Е.М., Маслова С.П., Табаленкова Г.И., Гарабаджигу А.В.* Использование интегрального коэффициента

биологической активности почвы и индекса фитотоксичности для оценки фиторемедиации нефтезагрязнённых почв // Теоретическая и прикладная экология. 2015. № 2. С. 67–73.

27. *Шпаар Д., Захаренко А.В., Якушев В.П.* Точное сельское хозяйство. СПб., Пушкин, 2009. 397 с.

28. *Щербакова Т.А.* Ферментативная активность почв и трансформация органического вещества. Минск, 1983. 222 с.

29. *Яковлев А.С.* Вопросы экологического нормирования и установления фоновых значений свойств почв природных и природно-антропогенных объектов // Почвоведение. 2022. № 2. С. 252–260.

30. *Яковлева А.С., Евдокимова М.В.* Подход к установлению зон экологической ответственности предприятий и уровней природно-антропогенного фона почв // Почвоведение. 2022. № 9. С. 1167–1178.

31. *Adhikari K., Hartemink A.E.*, Linking soils to ecosystem services – A global review. *Geoderma*. 2016. Vol. 262. P.101–111.

32. *Frankeberger W.T., Johanson J.B.* Method of measuring invertase activity in soils // *Plant and soil*. 1983. Vol. 74. P. 301–311.

33. *Garcia-Gil J.C., Plaza C., Soler-Rovira P., Polo A.* Long-term effects of municipal solid waste compost application on soil enzyme activities and microbial biomass // *Soil Biology & Biochemistry*. 2000. Vol. 32. P. 1907–1913.

34. *Gracheva R.G.* Genetic and substantive soil classifications and their applicability in geobotanical research // *Plant Biology and Horticulture: theory, innovation*. 2019. Vol. 149. P. 55–64.

35. *Gurevitch J., Larry V.H.* Meta-analysis: combining the results of independent experiments // *Design and analysis of ecological experiments*. Oxford.USA. 2001. P. 378–398.

36. *Kimes N.E., Callaghan A.V., Suflita J.M., Morris P.J.* Microbial transformation of the Deepwater Horizon oil spill – past, present, and future perspectives. *Front. Microbiol.* 2014. Vol. 5. 603 p.

37. *Kocak B.* Importance of urease activity in soil // V International Scientific and Vocational Studies Congress – Science and Health. 2020. P. 51–60.

38. *Liu J., Niu J., Yin L., Jiang F.* In situ encapsulation of laccase in nanofibers by electrospinning for development of enzyme biosensors for chlorophenol monitoring // *Analyst*. 2011. Vol. 136. P. 4802–4808.

39. *Maila M.P., Cloete T.E.* The use of biological activities to monitor the removal of fuel contaminants – perspectives to monitoring hydrocarbon contamination: a review // *Int. Biodeterior. Biodegrad.* 2005. Vol. 55. P. 1–8.

40. *Oldfield E.E., Bradford M.A., Wood S.A.* Global meta-analysis of the relationship between soil organic matter and crop yields. 2019. Vol. 5. No.1. P. 15–32.

41. Papa S., Bartoli G., Pellegrino A., Fioretto A. Microbial activities and trace element contents in an urban soil // *Environ. Monit.* 2009. Vol. 165. P. 193–203.
42. Polyak Y.M., Bakina G.L., Chugunova M.V., Mayachkina N.V. Gerasimov A.O., Bure V.M. Effect of remediation strategies on biological activity of oil-contaminated soil-A field study // *International Biodeterioration & Biodegradation*. 2018. Vol. 126. P. 57–68.
43. Riveroll-Larios J., Escalante-Espinosa E., Fócil-Monterrubio R.L., Díaz-Ramírez I.J. Biological activity assessment in Mexican tropical soils with different hydrocarbon contamination histories // *Water Air Soil Pollut.* 2015. Vol. 226. No. 10. 353 p.
44. Robert P.C. Precision agriculture: a challenge for crop nutrition management // *Plant Soil*. 2002. Vol. 247. P. 143–149.
45. Shi Z.J., Lu Y., Xu Z.G., Fu S.L. Enzyme activities of urban soils under different land use in the Shenzhen city, China // *Plant Soil Environ.* 2008. Vol. 54. No. 8. P. 341–346.
46. Soldatkin O.O., Kucherenko I.S., Pyeshkova V.M., Kukla A.L., Jaffrezic-Renault N., Elskaya A.V., Dzyadevych S.V., Soldatkin A.P. Novel conductometric biosensor based on three-enzyme system for selective determination of heavy metal ions // *Bioelectrochem.* 2012. Vol. 83. P. 25–30. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2011.08.001>.
47. Stroud J.L., Paton G.I., Semple K.T. Microbe- aliphatic hydrocarbon interactions in soil: implications for biodegradation and bioremediation // *Journal of Applied Microbiology*. 2007. Vol. 102.5. P. 1239–1253.
48. World reference base for soil resources 2014, update 2015 International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. – *World Soil Resources Reports №106*. Rome: FAO, 2015. 203 p.
49. Wu M., Dick W.A., Li W., Wang X., Yang Q., Wang T., Xu L., Zhang M., Chen L. Bioaugmentation and biostimulation of hydrocarbon degradation and the microbial community in a petroleum-contaminated soil // *Int. Biodeterior. Biodegrad.* 2016. Vol. 107. P. 158–164.
50. Zhao Z., Jiang H. Enzyme-based electrochemical biosensors // *Biosensors / Serra P.A.* (Ed.). Croatia: Intech, 2010. P. 1–22.

REFERENCES

1. Balandina A.V., Eremchenko O.Z., Dynamics of the number of microorganisms in oil-contaminated sod-carbonate soil during remediation, *Bulletin of Perm University. Series: Biology*, 2018, No. 3, pp. 301–30, DOI: <https://doi.org/10.17072/1994-9952-2018-3-301-307>. (In Russ.)
2. Vazhenin I.G., Muzychkin E.T., Prokhorova Z.A., Aleshina T.N., On the

methodology for compiling large-scale soil-agrochemical cartograms for the purpose of using fertilizers, *Eurasian Soil Science*, 1961, No. 4, pp. 1–13. (In Russ.)

3. Val'kov V.F., Eliseeva N.V., Imgrunt I. Iyu, Kazeev K.Sh., Kolesnikov S.I., *Soil assessment handbook*, Maikop: GURIPP “Adygeya”, 2004, 236 p. (In Russ.)

4. Devyatova T.A., Biological principles of monitoring and diagnostics of soil pollution, *Proceedings of Voronezh State University. Series: Chemistry. Biology. Pharmacy*. 2005, No. 1, pp. 105–106. (In Russ.)

5. Denisov K.E., Petrov K.A., Grigor'ev N.S., Increasing the economic efficiency of crop production based on differentiated application of fertilizers in a precision farming system, *Science yesterday, today, tomorrow*, 2016, No. 5, pp. 72–76. (In Russ.)

6. Eremchenko O.Z., Saptsyn R.V., Lozhkina E.A., Tyrshu E.V., Assessment of performance of oil-contaminated soil reclamation, *Bulletin of Perm University. Series: Biology*, 2022, No. 1, pp. 64–71, DOI: <https://doi.org/10.17072/1994-9952-2022-1-64-71>. (In Russ.)

7. Zvyagintsev D.G., Biological activity of soils and scales for assessing some of its indicators, *Eurasian Soil Science*, 1978, No. 6, pp. 48–54. (In Russ.)

8. Ismailov N.M., Microbiology and enzymatic activity of oil-contaminated soils, In: *Restoration of Oil-Contaminated Soil Ecosystems*, Moscow: Nauka, 1988, pp. 42–57. (In Russ.)

9. Kireeva N.A., Vodop'yanov V.V., Miftakhova A.M., *Biological activity of oil-contaminated soils*, Ufa: Gilem, 2001, 376 p. (In Russ.)

10. Kireeva N.A., Novoselova E.I., Grigoriadi A.S., The influence of soil pollution with oil on the physiological parameters of plants and rhizosphere microbiota, *Agricultural Chemistry*, 2009, No. 7, pp. 71–80. (In Russ.)

11. Dobrovolsky G.V., *Classification and diagnostics of soils in Russia*, Smolensk: Oikumena, 2004, 342 p. (In Russ.)

12. Kurbatov Yu.N., Skripchenko L.S., Trifonova T.A., Study of the influence of oil pollution on catalase activity of soil, *Problems of environmental education in the XXI century*, 2019, pp. 308–313. (In Russ.)

13. On approval of the Procedure and measures for the protection of rare and endangered soils listed in the Red Book of Soils of Perm Krai, the list of rare and endangered soils listed in the Red Book of Soils of Perm Krai: Resolution of the Government of Perm Krai No. 447-p (approved by the Governor of Perm Krai on May 27, 2022. (In Russ.)

14. Pastukhov A.V., Problems of classification and diagnostics of technogenic soils when compiling large-scale maps, *Theoretical and Applied Ecology*, 2013, No. 2, pp. 74–80. (In Russ.)

15. Eremchenko O.Z., Mitrakova N.V., Russian Federation Patent No. 2620555. *Method for assessing the biological activity and toxicity of soils and technogenic soil grounds*. Application No. 2016113050. Published. May 26, 2017. (In Russ.)
16. Samsonova V.P., *Spatial variability of soil properties using the example of soddy-podzolic soils*, Moscow: Izd-vo "LKI", 2008, 156 p. (In Russ.)
17. Samsonova V.P., Krotov D.G., Lavrinova E.Yu., Spatial variability of agrochemical properties of agricultural land in the Bryansk region, *Agricultural Chemistry*, 2017, No. 7, pp. 11–18. (In Russ.)
18. Samsonova V.P., Meshalkina J.L., Common inaccuracies and errors in the application of statistical methods in soil science, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2020, Vol. 102, pp. 164–182, DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-102-164-182>. (In Russ.)
19. Sapsyn R.V., Eremchenko O.Z., Indicators of the ecological and biological state of oil-contaminated soddy-podzolic soil, *AgroEcoInfo Electronic science-productive magazine*, 2023, No. 4 (58). (In Russ.)
20. Terekhova V.A., Bioassay of Soil Ecotoxicity under Chemical Pollution: Modern approaches to integration for the ecological state (review), *Eurasian Soil Science*, 2022, No. 5, pp. 586–599, DOI: <https://doi.org/10.31857/S0032180X220500>. (In Russ.)
21. Terekhova V.A., Prudnikova E.V., Kulachkova S.A., Gorlenko M.V., Uchanov P.V., Sushko S.V., Anan'eva N.D., Microbiological indicators of heavy metals and carbon-containing preparations introduction to agrosoddy-podzolic soils differing in humus content, *Eurasian Soil Science*, 2021, No. 3, pp. 372–384. (In Russ.)
22. Tishin A.S., Phytotesting of soils contaminated with petroleum products, *International Scientific Research Journal*, 2020, No. 12 (102), Vol. 2, pp. 78–83. (In Russ.)
23. Tonkonogov V.D., The first Russian version of the World Reference Base for Soil Resources (WRB), *Eurasian Soil Sc.*, 2008, No. 41, pp. 660–663, DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229308060112>.
24. Khaziev F.Kh., *Methods of soil enzymology*, Moscow, Nauka, 2005, 252 p. (In Russ.)
25. Khaziev F.Kh., Tishkina E.I., Kireeva N.A., Kuzyakhmetov G.G., The impact of oil pollution on some components of the agroecosystem, *Agricultural Chemistry*, 1988, No. 2, pp. 56–61. (In Russ.)
26. Sharapova I.E., Lapteva E.M., Maslova S.P., Tabalenkova G.I., Garabadzhiu A.V., Using the integral coefficient of soil biological activity and the phytotoxicity index to assess phytoremediation of oil-contaminated soils, *heoretical and Applied Ecology*, 2015, No. 2, pp. 67–73. (In Russ.)
27. Shpaar D., Zakharenko A.V., Yakushev V.P., *Precision Agriculture*, Saint-

Petersburg, Pushkin, 2009, 397 p. (In Russ.)

28. Shcherbakova T.A., *Enzymatic activity of soils and transformation of organic matter*, Minsk, 1983, 222 p. (In Russ.)

29. Yakovlev A.S., Issues of ecological regulation and establishment of background values of soils of natural and natural anthropogenic objects, *Eurasian Soil Sc.*, 2022, Vol. 55, pp. 262–268, DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229322020144>.

30. Yakovlev A.S., Evdokimova M.V., Approach to establishment of enterprises environmental responsibility zones and natural-anthropogenic background soil values, *Eurasian Soil Sc.*, 2022, Vol. 55, 1295–1305, DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229322090150>.

31. Adhikari K., Hartemink A.E., Linking soils to ecosystem services – A global review, *Geoderma*, 2016, Vol. 262, pp. 101–111.

32. Frankeberger W.T., Johanson J.B., Method of measuring invertase activity in soils, *Plant and soil.*, 1983, Vol. 74., pp. 301–311.

33. Garcia-Gil J.C., Plaza C., Soler-Rovira P., Polo A., Long-term effects of municipal solid waste compost application on soil enzyme activities and microbial biomass, *Soil Biology & Biochemistry*, 2000, Vol. 32, pp. 1907–1913.

34. Gracheva R.G., Genetic and substantive soil classifications and their applicability in geobotanical research, *Plant Biology and Horticulture: theory, innovation*, Vol. 149, 2019, pp. 55–64.

35. Gurevitch J., Hedges V.L., Meta-analysis: combining the results of independent experiments, *Design and analysis of ecological experiments*, Oxford, USA, 2001, pp. 378–398.

36. Kimes N.E., Callaghan A.V., Suflita J.M., Morris P.J., Microbial transformation of the Deepwater Horizon oil spill – past, present, and future perspectives, *Front. Microbiol.*, 2014, Vol. 5, 603 p.

37. Kocak B., Importance of urease activity in soil, *V International Scientific and Vocational Studies Congress – Science and Health*, 2020, pp. 51–60.

38. Liu J., Niu J., Yin L., Jiang F., In situ encapsulation of laccase in nanofibers by electrospinning for development of enzyme biosensors for chlorophenol monitoring, *Analyst*, 2011, Vol. 136, pp. 4802–4808.

39. Maila M.P., Cloete T.E., The use of biological activities to monitor the removal of fuel contaminants – perspectives to monitoring hydrocarbon contamination: a review, *Int. Biodeterior. Biodegrad.*, Vol. 55, 2005, pp. 1–8.

40. Oldfield E.E., Bradford M.A., Wood S.A., Global meta-analysis of the relationship between soil organic matter and crop yields, *Soil*, 2019, Vol. 5, No. 1, pp. 15–32.

41. Papa S., Bartoli G., Pellegrino A., Fioretto A., Microbial activities and trace element contents in an urban soil, *Environ. Monit.*, 2009, Vol. 165,

pp. 193–203.

42. Polyak Y.M., Bakina L.G., Chugunova M.V., Mayachkina N.V., Gerasimov A.O., Bure V.M., Effect of remediation strategies on biological activity of oil-contaminated soil – A field study, *International Biodeterioration & Biodegradation*, Vol. 126, 2018, pp. 57–68.

43. Riveroll-Larios J., Escalante-Espinosa E., Fócil-Monterrubbio R.L., Díaz-Ramírez I.J., Biological activity assessment in Mexican tropical soils with different hydrocarbon contamination histories, *Water Air Soil Pollut.*, 2015, Vol. 226, No. 10, 353 p.

44. Robert P.C., Precision agriculture: a challenge for crop nutrition management, *Plant Soil*, 2002, Vol. 247, pp. 143–149;

45. Shi Z.J., Lu Y., Xu Z.G., Fu S.L., Enzyme activities of urban soils under different land use in the Shenzhen city, China, *Plant Soil Environ*, 2008, Vol. 54, No. 8, pp. 341–346.

46. Soldatkin O.O., Kucherenko I.S., Pyeshkova V.M., Kukla A.L., Jaffrezic-Renault N., Elskaya A.V., Dzyadevych S.V., Soldatkin A.P., Novel conductometric biosensor based on three-enzyme system for selective determination of heavy metal ions, *Bioelectrochem*, 2012, Vol. 83, pp. 25–30.

47. Stroud J.L., Paton G.I., Semple K.T., Microbe- aliphatic hydrocarbon interactions in soil: implications for biodegradation and bioremediation, *Journal of Applied Microbiology*, 2007, Vol. 102 (5), pp. 1239–1253.

48. World reference base for soil resources 2014, update 2015 International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. – *World Soil Resources Reports*, No. 106, Rome: FAO, 2015, 203 p.

49. Wu M., Dick W.A., Li W., Wang X., Yang Q., Wang T., Xu L., Zhang M., Chen L., Bioaugmentation and biostimulation of hydrocarbon degradation and the microbial community in a petroleum-contaminated soil, *Int. Biodeterior. Biodegrad.*, Vol. 107, 2016, pp. 158–164.

50. Zhao Z., Jiang H., Enzyme-based electrochemical biosensors, In: *Biosensors*, Serra P.A. (Ed.), Croatia: Intech, 2010, pp. 1–22.

УДК 631.417.2:631.42

DOI: 10.19047/0136-1694-2026-128-241-258



Ссылки для цитирования:

Мешалкина Ю.Л., Морозов И.В., Самсонова В.П., Замулина И.В., Соловьев Д.А. Минимальная повторность проб при проведении контрольно-надзорных мероприятий для выявления изменения в содержании органического вещества почв // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2026. Вып. 128. С. 241-258. DOI: 10.19047/0136-1694-2026-128-241-258

Cite this article as:

Meshalkina J.L., Morozov I.V., Samsonova V.P., Zamulina I.V., Soloviev D.A., Minimum repeatability of laboratory tests to identify changes in the content of soil organic matter, Dokuchaev Soil Bulletin, 2026, V. 128, pp. 241-258, DOI: 10.19047/0136-1694-2026-128-241-258

Благодарность:

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 25-46-10013).

Acknowledgments:

The research was funded by the Russian Science Foundation (project No. 25-46-10013).

Минимальная повторность проб при проведении контрольно-надзорных мероприятий для выявления изменения в содержании органического вещества почв

© 2026 г. Ю. Л. Мешалкина^{1*}, И. В. Морозов^{2,3**},
В. П. Самсонова^{1***}, И. В. Замулина^{3****}, Д. А. Соловьев^{2*****}

¹МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия,

119991, Москва, Ленинские горы, 1, стр. 12,

*<https://orcid.org/0000-0003-1513-2439>, e-mail: jlmesh@list.ru,

***<https://orcid.org/0000-0003-2142-0293>, e-mail: vkbun@mail.ru.

²ФИЦ “Почвенный институт им. В.В. Докучаева”, Россия,

119017, Москва, Пыжжевский пер, 7, стр. 2,

****<https://orcid.org/0009-0004-3590-754X>, e-mail: solovev@esoil.ru.

³Южный федеральный университет, Россия,

344006, Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, 105/42,

** <https://orcid.org/0000-0003-0292-068X>, e-mail: migovad@sfedu.ru,
*** <https://orcid.org/0000-0001-6279-6428>, e-mail: ivzamulina@sfedu.ru.

Поступила в редакцию 16.12.2024, после доработки 26.01.2026,
принята к публикации 29.04.2026

Резюме: Приведены расчеты минимальной повторности точечных и объединенных проб почв при проведении контрольно-надзорных мероприятий для выявления статистически достоверного изменения в содержании органического вещества (ОВ), определенного по ГОСТ 26213–91 (метод И.В. Тюрина). В качестве порогового значения, согласно нормативным требованиям, взято снижение содержания ОВ в пахотном горизонте на 15%. Рассмотрен вклад аналитической погрешности и пространственного варьирования значений этого показателя в конечный результат. Пространственное варьирование содержания ОВ было проанализировано для дерново-подзолистых почв, черноземов южных и черноземов обыкновенных. Оказалось, что, при малых значениях содержания ОВ (до 3%) аналитическая повторность должна быть не менее $n = 2$. При больших значениях аналитическая повторность может быть однократной. Число точечных проб при оценке среднего значения содержания ОВ с доверительной вероятностью 0.95 может достигать нескольких десятков и зависит от величины пространственного варьирования, которое может быть описано коэффициентом вариации. Отбор объединенных проб резко уменьшает число аналитических повторностей, однако при этом возрастают требования к процедуре смешивания – первичные пробы должны быть одинакового объема, а качество смешивания тщательно контролироваться путем измельчения всей отобранной массы почвы.

Ключевые слова: гумус; опробование; пахотный горизонт, расчет объема выборки; дерново-подзолистые почвы; черноземы; объединенная проба; точечная проба; почвенно-экологическая экспертиза.

Minimum repeatability of laboratory tests to identify changes in the content of soil organic matter

© 2026 J. L. Meshalkina^{1*}, I. V. Morozov^{2,3**}, V. P. Samsonova^{1***},
I. V. Zamulina^{3****}, D. A. Soloviev^{2*****}

¹Lomonosov Moscow State University,
12 Bld. 1 Leninskie Gori, Moscow 119991, Russian Federation,
* <https://orcid.org/0000-0003-1513-2439>, e-mail: jlmesh@list.ru,
** <https://orcid.org/0000-0003-2142-0293>, e-mail: vkun@mail.ru.

²*Federal Research Centre “V.V. Dokuchaev Soil Science Institute”,
7 Bld. 2 Pyzhevskiy per., Moscow 119017, Russian Federation,
**** <https://orcid.org/0009-0004-3590-754X>, e-mail: solovev@esoil.ru.*

³*Southern Federal University,
105/42 Bolshaya Sadovaya Str., Rostov-on-Don 344006, Russian Federation,
** <https://orcid.org/0000-0003-0292-068X>, e-mail: migovad@sfedu.ru,
*** <https://orcid.org/0000-0001-6279-6428>, e-mail: ivzamalina@sfedu.ru.*

Received 16.12.2024, Revised 26.01.2026, Accepted 29.04.2026

Abstract: The paper outlines the calculations for the minimum number of individual and combined samples required for control and inspector measures to detect a statistically significant change in the soil organic matter content, as determined according to GOST 26213-91 (the Tyurin's method). The threshold for this change is a decrease of the organic matter content in the arable soil layer by 15%. The paper also considers the impact of analytical error and spatial variation on the final result. Spatial variation was analyzed for sod-podzolic soils, southern chernozems, and ordinary chernozems. It was found that for low values of the substance content (up to 3%), the analytical repeatability should be at least $n = 2$. For higher values, the analytical repeatability may be reduced to a single sample. The number of individual samples needed to estimate the average organic matter content with a confidence level of 0.95 can vary widely, ranging from a few to several dozen, depending on the extent of spatial variation, which is characterized by the coefficient of variation. By combining samples, the number of analytical repetitions can be significantly reduced, but this approach also requires more careful consideration of mixing requirements. The primary samples must be of the same volume, and the mixing process must be carefully controlled to ensure uniformity.

Keywords: humus; soil sampling; calculation of soil sample selection; sod-podzolic soils; southern chernozems; ordinary chernozems; combined soil sample; soil sample; individual soil sample; soil and environmental expertise.

ВВЕДЕНИЕ

При осуществлении функций по исполнению земельного и природоохранного законодательства контрольно-надзорные органы (Россельхознадзор, Росприроднадзор, Министерства природных ресурсов и экологии субъектов Российской Федерации), иные контролирующие органы, а также органы дознания, следствия и суды сталкиваются с необходимостью всестороннего, полного и объективного исследования событий, имеющих признаки порчи

земли (почвы). К одному из таких признаков относится порча плодородного слоя почвы, который устанавливается в том числе по снижению содержания органического вещества или гумуса.

Согласно Постановлению Правительства Российской Федерации от 22.07.2011 г. № 612, существенным снижением плодородия земель сельскохозяйственного назначения является изменение числовых значений не менее трех следующих критериев:

- снижение содержания органического вещества в пахотном горизонте на 15% или более;
- снижение кислотности в кислых почвах (pH_{KCl}) на 10% или более;
- повышение щелочности в щелочных почвах (pH_{H_2O}) на 10% или более;
- снижение содержания подвижного фосфора (мг/кг почвы) на 25% или более;
- снижение содержания обменного калия (мг/кг почвы) на 25% или более.

Поскольку невыполнение требований части 2 статьи 13 Земельного кодекса РФ по воспроизводству плодородия почв влечет за собой возмещение причиненного вреда в стоимостном выражении, а также наложение административных штрафов и иных форм ответственности вплоть до уголовной по статьям 246, 247 и 254 Уголовного кодекса РФ, то для объективной оценки соответствия земельных участков этим требованиям необходим адекватный отбор почвенных проб и статистический анализ полученных результатов.

В рассматриваемом Постановлении Правительства Российской Федерации от 22.07.2011 г. № 612 не указываются нормативные требования к методам, способам и приемам, применяемым для проведения оценки изменений. Однако на результат будет влиять не только погрешность анализа, но и характер пространственной изменчивости показателей в пределах земельного участка или его части. При этом способ опробования может внести существенный вклад в точность полученного значения (Самсонова, Мешалкина и др., 2023), поэтому способ контроля должен соответствовать поставленным целям.

В настоящее время основные схемы опробования почвы

сформулированы в следующих нормативных документах: ГОСТ 17.4.3.01-2017, ГОСТ 17.4.4.02-2017, ПНД Ф 12.1:2.2.2:2.3:3.2-03, а также методических инструкциях и рекомендациях. Необходимое число точечных и объединенных проб почвы заранее регламентировано несмотря на то, что оно может быть как недостаточным, так и избыточным для решения поставленной задачи. В большинстве случаев пространственное варьирование нивелируется определениями в объединенной пробе, подразумевается, что физическое усреднение почвенной массы эквивалентно математическому усреднению, а сама объединенная проба может характеризовать большой участок.

Мерой варьирования значений свойства выступает его дисперсия $s_{\text{общ}}^2$, которая может быть представлена в виде уравнения 1 (Дмитриев, 1995):

$$s_{\text{общее}}^2 = s_{\text{ан}}^2 + s_{\text{прир}}^2, \quad (1)$$

где, $s_{\text{ан}}^2$ и $s_{\text{прир}}^2$ – аналитическая и природная дисперсии соответственно. Отметим, что каждая из составляющих может быть при желании детализирована, если в этом возникает необходимость.

Цель настоящей работы – установить минимальную повторяемость для выявления статистически достоверного изменения в содержании органического вещества, определяемого по ГОСТ 26213-91 "Почвы. Метод определения органического вещества" (метод И.В. Тюрина и его модификации), и оценить вклад каждого источника варьирования в конечный результат. Пространственное варьирование содержания органического вещества для земель сельскохозяйственного назначения с различным видом разрешенного использования (угодья) было проанализировано для дерново-подзолистых почв, черноземов южных и черноземов обыкновенных.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Аналитическая погрешность. Аналитическая погрешность для определения содержания органического вещества регламентируется согласно ГОСТ 26213-91, в котором сказано, что *предельные значения относительной погрешности ε (%) результатов ана-*

лиза почвенной пробы для двусторонней доверительной вероятности $P = 0.95$ составляют в процентах (отн.):

20% – при массовой доле органического вещества до 3%;

15% – от 3 до 5%;

10% – от 5 до 15%.

Приведенные в ГОСТе значения представляют собой 95%-ый доверительный интервал для значений нормально распределенной случайной величины. Абсолютное значение аналитической погрешности s для результата x равно:

$$s = \frac{\varepsilon \times x}{Z_{0.95} \times 100\%}, \quad (2)$$

где ε – относительная погрешность, $Z_{0.95}$ – значение стандартного нормального распределения при уровне значимости α . $Z_{0.95} = 2$ – значение стандартного нормального распределения при уровне значимости α .

Например, если содержание гумуса составляет 1%, то, согласно ГОСТу, предельное значение относительной погрешности результата будет составлять 20%, а аналитическая погрешность s будет равна, если принять $Z_{0.95}=2$:

$$s = \frac{20\% \times 1}{2 \times 100\%} = 0,10 \quad (3)$$

В таблице 1 приведены аналогичные расчеты для всего диапазона значений. Повторены с небольшим шагом те значения, где происходят скачкообразные изменения.

Расчет значения разности, которую нужно выявить согласно постановлению. Рассчитаем абсолютные значения разницы значений содержания органического вещества, которую нужно выявить при мониторинге. Согласно постановлению, она составляет 15% от значения. Если содержание органического вещества равно 1%, то абсолютное значение разницы, которую нужно выявить, составит 0.15%. В таблице 2 приведены значения абсолютной разницы для всего диапазона возможных значений содержания органического вещества.

Таблица 1. Аналитическая погрешность для диапазона значений содержания органического вещества, рассчитанная исходя из значений относительной аналитической погрешности результата для двусторонней доверительной вероятности $P = 0.95$

Table 1. Analytical error for the range of organic matter content values, calculated based on the relative analytical error of the result at a two-sided confidence level of $P=0.95$.

Содержание органического вещества, %	Половина доверительного интервала 20, 15 или 10% процентов от значения	Относительная аналитическая погрешность, в % от значения	Абсолютные значения аналитической погрешности (ст. откл. аналитическое), %
0.5	20%	10%	0.05
1.0	20%	10%	0.10
2.9	20%	10%	0.29
3.1	15%	7.5%	0.23
4.0	15%	7.5%	0.30
4.9	15%	7.5%	0.37
5.1	10%	5%	0.26
7.0	10%	5%	0.35

Расчет объема выборки при выявлении отличий среднего с некоторым числом, если варьирование обусловлено только аналитической погрешностью. Рассмотрим случай, когда есть некоторое критическое значение, с которым нужно будет сравнить результаты будущего исследования. Например, это может быть значение, известное из справочников, или характеристика, измеренная до начала воздействия и т. п. Рассчитать необходимую повторность для определения среднего значения содержания с абсолютной погрешностью d можно согласно формуле (Webster, Oliver, 1990; Козлов, 2014) (4):

$$n = \left(\frac{z_{\alpha} s}{d} \right)^2, \quad (4)$$

где n – объем выборки, s – аналитическая погрешность (стандартное отклонение), d – разность, которую надо выявить; значения

для нормально распределенной случайной величины можно считать равными $Z_\alpha = 1.7$ для $\alpha = 0.1$; $Z_\alpha = 2$ для $\alpha = 0.05$ и $Z_\alpha = 2.6$ для $\alpha = 0.01$.

Таблица 2. Абсолютные значения разницы, которую нужно выявить при мониторинге, исходя из значения в 15% от значений содержания органического вещества

Table 2. Absolute values of the difference to be detected during monitoring, based on a value of 15% of the organic matter content values

Содержание органического вещества, %	Абсолютные значения отличий на 15%
0.5	0.075
1.0	0.150
2.9	0.435
3.1	0.465
4.0	0.600
4.9	0.735
5.1	0.765
7.0	1.050

При содержании 1% органического вещества и абсолютной разности, которую надо выявить в 0.15%, повторность составит:

$$n = \left(\frac{2 \times 0.1}{0.15} \right)^2 = 1.71 \approx 2, \quad (5)$$

В таблице 3 приведена необходимая повторность для выявления отличий в 15% от содержания органического вещества.

Таким образом, для выявления снижения содержания вещества в единственном объединенном смешанном образце, характеризующем все угодье, при высоких содержаниях достаточно одной повторности, а для малых содержаний (меньше 3%) необходимо две повторности. Можно предложить использовать этот вариант планирования для задач, возникающих в лабораторной практике: для сравнения результатов, полученных на одних и тех

же образцах, но разными модификациями метода Тюринга, или для межлабораторных сравнений.

Таблица 3. Объем выборки (n), необходимый для выявления отличий в 15%, если отличия обусловлены только аналитической погрешностью, для случая сравнения среднего с заданным числом

Table 3. Sample size (n) required to detect a 15% difference if the difference is due only to analytical error, for the case of comparing the mean with a given number

Содержание органического вещества, %	Отличие на 15 %	Значения n согласно формуле (4) без округления	Объем выборки n, результат округления вверх
0.5	0.075	1.778	2
1.0	0.150	1.778	2
2.9	0.435	1.778	2
3.1	0.465	1.000	1
4.0	0.600	1.000	1
4.9	0.735	1.000	1
5.1	0.765	0.444	1
7.0	1.050	0.444	1

Расчет объема выборки при выявлении отличий среднего с некоторым числом, если варьирование реализуется на некотором угодье и присутствует пространственное варьирование. Приведенный выше расчет относится к анализу единичной пробы. Однако, как известно, свойства почв варьируют в пространстве, и эта вариабельность может быть достаточно большой. Если обратиться к научным публикациям, то коэффициент вариации для содержания органического вещества в пахотном слое угодий дерново-подзолистых почв колеблется в пределах от 7 до 27% при медианном значении в 15% (Белобров, 1972; Березовский и др., 1984; Готра, 2004; Самсонова и др., 1999; Самсонова и др., 2023; Хитров, 2023).

Анализ содержания гумуса в горизонтах $A_{\text{пах}}$ черноземных почв Ростовской области (черноземы обыкновенные и черноземы южные) на примере около 9000 точечных почвенных образцов, размещенных в Ростовском региональном дата-центре Почвенно-географической базы данных России, показал, что коэффициенты вариации составляют:

– для черноземов южных среднесуглинистого и тяжелосуглинистого гранулометрического составов – 21–23%, легкоглинистых – 17%;

– для черноземов обыкновенных среднесуглинистого и тяжелосуглинистого гранулометрического составов – 18–26%, легкоглинистых – 15.5%.

Результаты вариационного анализа представлены в таблице 4.

Сделаем пересчет значений s , исходя из предположения, что коэффициент вариации составляет 25%. Тогда вне зависимости от содержания органического вещества повторность будет равна 12. Это следует из определения коэффициента вариации, формулы (4) и того факта, что мы должны уловить разницу в 15%. В результате получаем формулу (6):

$$d = 0,15 \times \bar{x}; V = \frac{s}{\bar{x}} * 100; n = \left(\frac{Z_{\alpha} s}{d} \right)^2 = \left(\frac{Z_{\alpha} \times V \times \bar{x}}{15 \times \bar{x}} \right)^2 = \left(\frac{Z_{\alpha} \times V}{15} \right)^2, (6)$$

где n – объем выборки, s – стандартное отклонение, d – разность, которую надо выявить, $Z_{\alpha} = 2$ для $\alpha = 0.05$, x – содержание органического вещества, V – коэффициент вариации, %.

Таким образом, в том случае, если надо определить среднее значение с учетом его пространственного варьирования при условии, что доверительная вероятность равна 0.95, число проб существенно возрастает (табл. 5).

Расчет объема выборки при выявлении отличий двух средних, если мониторинг реализуется на угодье, и варьирование допустимо считать одинаковым. Рассмотрим случай, когда проводится сравнение двух средних. Например, некоторое угодье необходимо опробовать последовательно до и после некоторого воздействия, или нужно сравнить два угодья.

Таблица 4. Статистические характеристики содержания гумуса в горизонтах $A_{\text{пах}}$ черноземных почв Ростовской области (черноземы обыкновенные и черноземы южные)

Table 4. Statistical characteristics of humus content in the ploughed horizons of chernozem soils of the Rostov region (ordinary chernozems and southern chernozems)

Показатель	Гранулометрический состав		
	Средние суглинки, содержание частиц < 0.01 мм 30–45%	Тяжелые суглинки, содержание частиц < 0.01 мм 45–60%	Легкие глины, содержание частиц < 0.01 мм 60–75%
Черноземы южные			
<i>m</i>	2.9	3.5	4.2
<i>me</i>	2.8	3.5	4.2
<i>s</i>	0.7	0.7	0.7
<i>V</i>	23.0	20.7	17
<i>min</i>	1.3	1.6	1.7
<i>max</i>	5.9	6.0	6.9
<i>n</i>	361	1044	1345
Черноземы обыкновенные			
<i>m</i>	3.4	3.8	4.3
<i>me</i>	3.2	3.7	4.2
<i>s</i>	0.9	0.7	0.7
<i>V</i>	25.9	18.2	15.5
<i>min</i>	1.9	1.8	2.1
<i>max</i>	7.3	7.6	7.9
<i>n</i>	113	1612	4480

Примечание. *m* – среднее значение, *me* – медиана, *s* – стандартное отклонение, *V* – коэффициент вариации, *min* – минимум, *max* – максимум, *n* – выборка (количество точечных значений).

Note. *m* is the mean value, *me* is the median, *s* is the standard deviation, *V* is the coefficient of variation, *min* is the minimum, *max* is the maximum, *n* is the sample (number of point values).

Таблица 5. Объем выборки (n) при сравнении отличий среднего с некоторым числом, если абсолютное значение разницы, которую нужно выявить, составляет 15% для разных коэффициентов вариации (V), описывающих пространственное варьирование

Table 5. Sample size (n) when comparing differences in the mean with a certain number if the absolute value of the difference to be detected is 15% for different coefficients of variation (V) describing spatial variation

V	n без округления	n , результат округления вверх
5%	0.44	1
7%	0.87	1
10%	1.78	2
15%	4.00	4
20%	7.11	8
25%	11.11	12
27%	12.96	13
30%	16.00	16

Расчеты суммарного объема двух выборок можно произвести по формуле (7), при этом делается допущение, что дисперсии двух выборок однородны (Webster, Oliver, 1990; Козлов, 2014) (7):

$$2n = \frac{2 \times (Z_{\alpha} + Z_{\beta})^2}{D^2}, \quad (7)$$

где D – нормированная разность между средними (эффект); Z_{α} – значение стандартного нормального распределения при уровне значимости α , Z_{β} – значение стандартного нормального распределения при уровне значимости β , β – вероятность ошибки 2-го рода, т. е. принятия гипотезы, которая на самом деле неверна. Для доверительной вероятности 95% $Z_{\alpha} = 1.96$, $Z_{\beta} = 0.84$. Нормированная разность между средними находится по формуле (8):

$$D = \frac{|\bar{x}_1 - \bar{x}_2|}{s} = \frac{15 \times \bar{x}_1}{\bar{x}_1 \times V} = \frac{15}{V} \quad (8)$$

Отсюда, уравнение (7) превращается в уравнение (9):

$$2n = \frac{2 \times (Z_{\alpha} + Z_{\beta})^2}{D^2} = \frac{2 \times (Z_{\alpha} + Z_{\beta})^2}{(15/V)^2} \quad (9)$$

По этой формуле находится суммарный объем для двух выборок. Для определения числа каждой из выборок нужно общий объем разделить на 2. Например, при коэффициенте вариации, равном 25%, объем каждой из сравниваемых выборок составляет 22 (табл. 6).

Таблица 6. Объем каждой из сравниваемых выборок, если абсолютные значения разницы, которую нужно выявить при мониторинге, составляют 15% от среднего

Table 6. The size of each of the compared samples if the absolute values of the difference to be identified during monitoring are 15% of the average

V	n без округления	n
5%	0.87	1
7%	1.71	2
10%	3.48	4
15%	7.84	8
20%	13.94	14
25%	21.78	22
27%	25.40	26
30%	31.36	32

Расчет объема выборки при выявлении отличий двух средних, если мониторинг реализуется на усмотрение и будет запланирована одинаковая повторность для расчета каждого из средних и при этом будут отбираться смешанные образцы из объединенной пробы, составленной из m точечных проб. При отборе объединенных проб из совокупности точечных одного веса, если почвенное свойство обладает свойством аддитивности, то стандартное отклонение будет уменьшаться на корень из m , где m – число точечных проб, для которых происходит объединение (Дмитриев, 1995) (табл. 7).

Таблица 7. Объем выборок (необходимая минимальная повторность) в зависимости от числа объединяемых точечных проб в образце (m) для каждой из двух сравниваемых выборок, если абсолютные значения разницы, которую нужно выявить при мониторинге, составляют 15% от среднего

Table 7. Sample sizes (required minimum number of replications) depending on the number of combined point samples (m) within the sample for each of the two compared samples, if the absolute difference to be detected during monitoring is 15% of the mean.

Коэффициент вариации, %	Число точечных проб для составления объединенной пробы					
	1	5	10	20	30	40
	Количество аналитических повторностей, n					
5	1	1	1	1	1	1
7	2	1	1	1	1	1
10	4	1	1	1	1	1
15	8	2	1	1	1	1
20	14	3	2	1	1	1
25	22	5	3	2	2	1
27	26	6	3	2	2	1
30	32	7	4	2	2	1

Таким образом, заключение о наличии различия средних значений в границах исследуемого земельного участка (угодья) или об отсутствии этого различия зависит от первичных предположений и от того, каким образом получается информация. В случае сравнения двух точечных проб почвы по содержанию органического вещества разность будет зависеть только от аналитической погрешности. Однако вывод о наличии или отсутствии различий исследуемого показателя в пахотном горизонте может быть оспорен, поскольку не учитывалось пространственное варьирование. Если отбирается объединенная проба, составляемая из совокупности точечных проб, ее представительность должна быть подтверждена схемой опробования, охватывающей весь исследуемый земельный участок (угодье).

При осуществлении контрольно-надзорных мероприятий, равно как и мониторинге состояния почвы земельного участка (угодья) возникает вопрос, насколько устойчив характер варьирования показателя во времени, которая выражается, в первую очередь, мерой разброса случайной величины (дисперсией) анализируемого свойства почвы. При внесении удобрений дисперсия может значительно увеличиваться, так что необходимо соблюдение сроков опробования.

И, наконец, размеры проб должны быть фиксированы, что при агрохимическом опробовании достигается отбором проб при помощи бура (Методические указания..., 2003; ГОСТ 17.4.3.01-2017). При других видах опробования размер пробы не столь определен, что также может вносить неопределенность в результаты определения показателей.

ВЫВОДЫ

При осуществлении контрольно-надзорных мероприятий по соблюдению требований земельного и/или природоохранного законодательства, а также в случае решения задач, возникающих при производстве судебно-экологических экспертиз с целью установления признаков существенного снижения содержания органического вещества в почве на 15% и более, согласно Постановлению Правительства Российской Федерации от 22.07.2011 г. № 612, предлагается выполнение следующих условий:

1. Число точечных (единичных) проб при оценке среднего значения содержания органического вещества с доверительной вероятностью $P = 0.95$ может достигать нескольких десятков. Например, согласно п. 7.8. ГОСТ Р 58595–2019 “Почвы. Отбор проб”, каждая объединенная проба составляется из не менее 20–40 точечных (единичных) проб.
2. При малых значениях содержания органического вещества ($\leq 3\%$) аналитическая повторность должна быть не менее $n = 2$. При больших значениях ($> 3\%$) аналитическая повторность может быть однократной.
3. Отбор объединенных проб обеспечивает резкое снижение количества требуемых аналитических повторностей, одна-

ко при этом возрастают требования к объединению: точечные (единичные) пробы должны быть одинакового объема, а качество смешивания должно тщательно контролироваться путем измельчения всей отобранной массы почвы.

4. Отличия в содержании органического вещества следует считать статистически достоверными в соответствии с используемым способом организации эксперимента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Белобров В.П.* Варьирование некоторых химических и морфологических свойств дерново-подзолистых почв в пределах элементарных почвенных ареалов и классификационных групп // Почвенные комбинации и их генезис. М.: Наука, 1972. С. 115–123.
2. *Березовский В.А., Семенов В.А., Политанская В.В.* Пространственная вариация содержания гумуса в почвах разной степени окультуренности // Свойства почв, их изменение при окультуривании и влияние на урожай в Северо-западной зоне РСФСР. Л.: СЗНИИСХ, 1984. С. 33–39.
3. ГОСТ 26213-91. Почвы. Методы определения органического вещества.
4. ГОСТ 17.4.3.01-2017. Межгосударственный стандарт. Охрана природы. Почвы. Общие требования к отбору проб.
5. ГОСТ Р 58595–2019. Почвы. Отбор проб.
6. ГОСТ 17.4.4.02-2017. Охрана природы (ССОП). Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа.
7. *Готра О.Н.* Структура пространственной неоднородности содержания гумуса в пахотном слое дерново-подзолистой почвы в пределах одного поля: Дис. ... канд. биол. наук. М., 2004. 120 с.
8. *Дмитриев Е.А.* Математическая статистика в почвоведении. М.: Изд-во МГУ, 1995. 320 с.
9. *Козлов М.В.* Планирование экологических исследований: теория и практические рекомендации. Товарищество научных изданий КМК, 2014. 171 с.
10. ПНД Ф 12.1:2.2.2:2.3:3.2-03. Методические рекомендации. Отбор проб почв, грунтов, донных отложений, илов, осадков сточных вод, шламов промышленных сточных вод, отходов производства и потребления.

11. Постановление Правительства Российской Федерации от 22.07.2011 г. № 612 “Об утверждении критериев существенного снижения плодородия земель сельскохозяйственного назначения”.
12. Самсонова В.П., Мешалкина Ю.Л., Добровольская В.А., Кондрашкина М.И., Дядькина С.Е., Филиппова О.И., Красильников П.В., Кротов Д.Г., Морозова Т.М. Исследование неопределенности оценок запасов гумуса в масштабах угодий // Почвоведение. 2023. № 11. С. 1437–1449.
13. Самсонова В.П., Мешалкина Ю.Л., Дмитриев Е.А. Структура пространственной вариабельности агрохимических свойств пахотной дерново-подзолистой почвы // Почвоведение. 1999. №11. С. 1359–1366.
14. Хитров Н.Б., Никитин Д.А., Иванова Е.А., Семенов М.В. Пространственно-временная изменчивость содержания и запасов органического вещества почвы: аналитический обзор // Почвоведение. 2023. № 12. С. 1493–1521.
15. Webster R., Oliver M.A. Statistical methods in soil and land survey. New York: Oxford University Press, 1990.

REFERENCES

1. Belobrov V.P., Variation of some chemical and morphological properties of sod-podzolic soils within elementary soil areas and classification groups, In: *Soil combinations and their genesis*, Moscow: Nauka, 1972, pp. 115–123. (In Russ.)
2. Berezovsky V.A., Semenov V.A., Politanskaya V.V., Spatial variation of humus content in soils with different degrees of cultivation, In: *Soil properties, their changes during cultivation and their influence on crop yield in the Northwestern zone of the RSFSR*, Leningrad: SZNIISKh, 1984, pp. 33–39. (In Russ.)
3. State standard. GOST 26213-91. Soils. Methods for determination of organic matter. (In Russ.)
4. State standard. GOST 17.4.3.01-2017. Interstate standard. Nature conservation. Soils. General requirements for sampling. (In Russ.)
5. State standard. GOST R 58595–2019. Soils. Sampling. (In Russ.)
6. State standard. GOST 17.4.4.02-2017. Environmental Protection (IUCN). Soils. Methods of sampling and preparing samples for chemical, bacteriological, and helminthological analysis. (In Russ.)
7. Gotra O.N., Structure of spatial heterogeneity of humus content in the arable layer of sod-podzolic soil within a single field, Cand. Biol. Sci. thesis, Moscow, 2004, 120 p. (In Russ.)
8. Dmitriev E.A., *Mathematical statistics in soil science*, Moscow: Moscow State University Press, 1995, 320 p. (In Russ.)

9. Kozlov M.V., *Planning environmental research: theory and practical recommendations*, KMK Scientific Publications Partnership, 2014, 171 p. (In Russ.)
10. Environmental regulatory document F 12.1:2:2.2:2.3:3.2-03. Methodological Recommendations. Sampling of Soils, Grounds, Bottom Sediments, Silts, Sewage Sludge, Industrial Wastewater Sludge, Production and Consumption Waste. (In Russ.)
11. Resolution of the Government of the Russian Federation of July 22, 2011, No. 612 “On Approval of the Criteria for a Significant Decrease in the Fertility of Agricultural Lands”. (In Russ.)
12. Samsonova V.P., Meshalkina Yu.L., Dobrovolskaya V.A., Kondrashkina M.I., Dyad'kina S.E., Filippova O.I., Krasilnikov P.V., Krotov D.G., Morozova T.M., Investigation of Uncertainty in Organic Carbon Stock Estimates on a Field Scale, *Eurasian Soil Sc.*, 2023, No. 56, pp. 1765–1775, DOI: <https://doi.org/10.1134/S106422932360183X>.
13. Samsonova V.P., Meshalkina Yu.L., Dmitriev E.A., Spatial variability patterns of the main agrochemical properties of plowed soddy-podzolic soils, *Eurasian Soil Sc.*, 1999, No. 11, pp. 1214–1220.
14. Khitrov N.B., Nikitin D.A., Ivanova E.A., Semenov M.V., Variability of the content and stock of soil organic matter in time and space: an analytical review, *Eurasian Soil Sc.*, Vol. 56, No. 12, pp. 1819–1844.
15. Webster R., Oliver M.A., *Statistical methods in soil and land survey*, New York: Oxford University Press, 1990.

Научное издание

Бюллетень Почвенного института
имени В.В. Докучаева

Выпуск 128

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 25.06.2026 г.
Подписано в печать 25.06.2026 г.
Формат 60×84/16. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 15,2 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