

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

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

БЮЛЛЕТЕНЬ

ПОЧВЕННОГО ИНСТИТУТА

имени В.В. ДОКУЧАЕВА

Выпуск 123

Москва
2025

<https://bulletin.esoil.ru>

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

V.V. DOKUCHAEV SOIL SCIENCE INSTITUTE

Dokuchaev Soil Bulletin

**(Byulleten Pochvennogo instituta
imeni V.V. Dokuchaeva)**

Volume 123

**Moscow
2025**

<https://bulletin.esoil.ru>

ББК П03
Б 98
УДК 631.4

Главный редактор:
Иванов А. Л., академик РАН

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

Редакционная коллегия:

А-Ксин Джу (университет Висконсина, США)
Когут Б. М. (Почвенный институт им. В.В. Докучаева, Москва)
Монтанарелла Л. (Институт окружающей среды и устойчивого развития Объединенного исследовательского центра Европейской комиссии, Италия)
Розанов А. Б. (Университет Стелленбош, ЮАР)
Тихонович И. А., академик РАН (Санкт-Петербургский университет, Санкт-Петербург)
Тот Г. (Университет Паннонии, Венгрия)
Хитров Н. Б. (Почвенный институт им. В.В. Докучаева, Москва)
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

Вероятные многолетние тренды деградации постпирогенных лесных почв России

*Аветян С.А., Герасимова М.И., Савицкая Н.В.,
Ананко Т.В., Савин И.Ю., Шишконокова Е.А.*5

Анализ гидрофизических свойств почв с использованием поросетевых моделей

*Толстыгин К.Д., Фомин Д.С., Юдина А.В., Герке К.М.*30

Стратегия спутникового мониторинга содержания органического углерода в пахотных горизонтах почв России

*Савин И.Ю., Прудникова Е.Ю., Виндекер Г.В., Соболев Н.С.*65

Потери органического углерода из почвы в результате перевода естественных лесов в сельскохозяйственные земли: Опыт Эритреи

*Tesfay T., Mohamed E.S., Mehrteab M.,
Ghebretnsae T.W., Sereke T.E.*100

Химическая структура органического вещества водоустойчивых микроагрегатов агрочерноземов разных позиций на склоне

*Артёмьева З.С., Колягин Ю.Г., Варламов Е.Б., Засухина Е.С.,
Цомаева Е.В., Ярославцева Н.В., Козут Б.М.*116

Содержание микроэлементов в черноземе южном плодового агроценоза

*Кучеренко А.В., Бирюкова О.А.*148

Оптимизация севооборотов на основе геостатистического анализа кислотности почвы и данных дистанционного зондирования земель с учетом финансовых издержек

*Киндеев А.Л., Гутько Ф.С.*179

Изменение кислотно-основных свойств дерново-подзолистой почвы во времени и по профилю при длительном использовании удобрений в условиях Предуралья

*Васбиева М.Т., Ямалтдинова В.Р.*213

Минералогия солодей в лимане на Джаныбекском стационаре института лесоведения РАН

*Варламов Е.Б., Лебедева М.П., Чурилин Н.А.,
Мусаэлян Р.Э., Колесников А.В., Чурилина А.А.*241

Библиометрический анализ публикаций о засолении почв в Центральной Азии за 2000–2022 гг. с акцентом на дренаж

*Канназарова З., Джулиев М., Муратов А.,
Астанакулов К., Шавазов К.*273

CONTENTS

Probable multi-year trends of degradation of post-pyrogenic forest soils in Russia

*Avetyan S.A., Gerasimova M.I., Savitskaya N.V.,
 Ananko T.V., Savin I.Yu., Shishkonakova E.A. 5*

Analysis of hydrophysical properties of soils using pore-network models

Tolstygina K.D., Fomin D.S., Yudina A.V., Gerke K.M.30

Strategy of satellite monitoring of organic carbon content in arable horizons of soils in Russia

Savin I.Yu., Prudnikova E.Yu., Windecker G.V., Sobolev N.S.65

Soil organic carbon losses following conversion of natural forests into agriculture: Insights from Eritrea

*Tesfay T., Mohamed E.S., Mehrteab M.,
 Ghebretsaie T.W., Sereke T.E.100*

Chemical structure of organic matter of water-stable microaggregates of agrochernozeams of different positions on the slope

*Artemyeva Z.S., Kolyagin Yu.G., Varlamov E.B., Zasukhina E.S.,
 Tsomaeva E.V., Yaroslavtseva N.V., Kogut B.M.116*

Content of trace elements in calcic chernozem of fruit agrocenosis

Kucherenko A.V., Biryukova O.A.148

Optimization of crop rotations based on geostatistical analysis of soil acidity and earth remote sensing data, taking into account financial costs

Kindeev A.L., Gutko F.S.179

Changes in the acid-base properties of soddy-podzol soil with time and along the profile, resulting from long-term use of fertilizers under the conditions of the Cis-Urals

Vasbieva M.T., Yamaltdinova V.R.213

Mineralogy of solods in the estuary at the Dzhanibek stationary site of the Institute of Forestry of the Russian Academy of Sciences

*Varlamov E.B., Lebedeva M.P., Churilin N.A.,
 Musaelyan R.E., Kolesnikov A.V., Churilina A.A.241*

Bibliometric analysis of publications about soil salinity in Central Asia during 2000–2022 with a special look at the importance of drainage

*Kannazarova Z., Juliev M., Muratov A.,
 Astanakulov K., Shavazov K.273*

УДК 638.47

DOI: 10.19047/0136-1694-2025-123-5-29



Ссылки для цитирования:

Аветян С.А., Герасимова М.И., Савицкая Н.В., Ананко Т.В., Савин И.Ю., Шишконокова Е.А. Вероятные многолетние тренды деградации постпирогенных лесных почв России // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2025. Вып. 123. С. 5-29. DOI: 10.19047/0136-1694-2025-123-5-29

Cite this article as:

Avetyan S.A., Gerasimova M.I., Savitskaya N.V., Ananko T.V., Savin I.Yu., Shishkonakova E.A., Probable multi-year trends of degradation of post-pyrogenic forest soils in Russia, Dokuchaev Soil Bulletin, 2025, V. 123, pp. 5-29, DOI: 10.19047/0136-1694-2025-123-5-29

Вероятные многолетние тренды деградации постпирогенных лесных почв России

© 2025 г. С. А. Аветян^{1,2*}, М. И. Герасимова^{1,2**},
Н. В. Савицкая^{1***}, Т. В. Ананко^{1****}, И. Ю. Савин^{1,3*****},
Е. А. Шишконокова^{1*****}

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

* <https://orcid.org/0000-0002-3435-9092>, e-mail: avetyan-serg@mail.ru,

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

maria.i.gerasimova@gmail.com,

*** <https://orcid.org/0000-0002-3218-6941>, e-mail: savitskaya_nv@esoil.ru,

**** <https://orcid.org/0000-0002-7317-6790>, e-mail: anankotat@yandex.ru,

***** <https://orcid.org/0000-0002-8739-5441>, e-mail: savin_iyu@esoil.ru,

***** <https://orcid.org/0000-0003-4396-2712>, e-mail:

shishkonakova_ea@esoil.ru.

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

³Институт экологии РУДН, Россия,
115093, Москва, Подольское шоссе, 8.

Поступила в редакцию 23.06.2024, после доработки 18.02.2025,
принята к публикации 03.06.2025

Резюме: Сопоставление почвенно-географических выделов Единого Государственного Реестра почв России с базой данных об исчезновении древесной лесной растительности за период с 2000 по 2021 гг., построенной по спутниковым данным Landsat, позволило выявить на территории страны ареалы почв, подвергшихся влиянию лесных пожаров. Наибольшее воздействие на почвенный покров отмечено для азиатской части Российской Федерации в пределах криолитозоны, где в зону пирогенеза попадают наиболее распространенные маломощные щепнистые почвы горно-таежных лесов: подбуры, подзолы, ржавоземы, торфяно-криоземы криогомогенные, почвы органо-аккумулятивного отдела, (карбо)литоземы, петроземы, т. е. почвы, наиболее подверженные процессам эрозии, а также льдисто-мерзлотные мелкоземистые почвы среднего и тяжелого гранулометрического состава: палевые, палевые осолоделые, глееземы, криоземы, в которых развиваются процессы заболачивания, солифлюкции, термокарста. Вероятность активизации процессов постпирогенной деградации почв в результате потери леса в период с 2000 по 2021 гг. существует примерно на 16% территории России. Это водная (10%) и ветровая (8%) эрозия, заболачивание (около 15%) и криогенные процессы солифлюкции (10%) и термокарста (7%). Территории с вероятной активизацией послепожарной водной эрозии находятся в Забайкалье, Северо-Восточной Якутии, на юге Дальнего Востока; дефляции – в Якутии, северном Прибайкалье и Забайкалье; заболачивания – на Центрально-Якутской озерно-аллювиальной равнине, в межгорных котловинах Забайкалья и Северо-Восточной Якутии, в Западной Сибири; криосолифлюкции и термокарста – в Центральной и Северной Якутии, Красноярском крае, в Магаданской области, на севере Амурской области.

Ключевые слова: лесные пожары; Landsat; почвы лесной зоны; постпирогенные тренды; региональный прогноз.

Probable multi-year trends of degradation of post-pyrogenic forest soils in Russia

© 2025 S. A. Avetyan^{1,2*}, M. I. Gerasimova^{1,2**}, N. V. Savitskaya^{1***},
T. V. Ananko^{1****}, I. Yu. Savin^{1,3*****}, E. A. Shishkonakova^{1*****}

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

* <https://orcid.org/0000-0002-3435-9092>, e-mail: avetyan-serg@mail.ru,

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

maria.i.gerasimova@gmail.com,
***<https://orcid.org/0000-0002-3218-6941>, e-mail: savitskaya_nv@esoil.ru,
***<https://orcid.org/0000-0002-7317-6790>, e-mail: anankotat@yandex.ru,
***<https://orcid.org/0000-0002-8739-5441>, e-mail: savin_iyu@esoil.ru,
*****<https://orcid.org/0000-0003-4396-2712>, e-mail:
shishkonakova_ea@esoil.ru.

²Lomonosov Moscow State University,
1 Leninskie Gori, Moscow 119234, Russian Federation.

³Institute of Environmental Engineering of RUDN University,
8 Podolskoe shosse, Moscow 115093, Russian Federation.

Received 23.06.2024, Revised 18.02.2025, Accepted 03.06.2025

Abstract: A comparison of soil-geographical units of the Unified State Register of Soils of Russia with a database on the disappearance of woody forest vegetation for the period from 2000 to 2021, built on Landsat satellite data, made it possible to identify soil areas in the country that were affected by forest fires. The greatest impact on the soil cover is noted for the Asian part of the Russian Federation within the cryolithozone, where the pyrogenesis zone mainly includes the most common here thin rubble soils of mountain taiga forests: podburs, podzols, rzhavozems, cryohomogeneous peat-cryozems, soils of the organo-accumulative section, (carbo)lithozems, petrozems, i.e. soils most susceptible to erosion processes, as well as ice-frozen fine-earth soils of medium-heavy granulometric composition: pale yellow, pale solodized, gleyzems, cryozems, in which the processes of paludification, cryosolifluction, thermokarst are activated. The probability of activation of post-pyrogenic soil degradation processes as a result of forest loss in the period from 2000 to 2021 exists on approximately 16 % of the territory of Russia. These are water (10 %) and wind (8 %) erosion, paludification (about 15 %) and cryogenic processes of solifluction (10 %) and thermokarst (7 %). Areas with a potential for increased post-fire water erosion are located in the Central Siberian Plateau, Transbaikalia, North-Eastern Yakutia, the south of the Far East; deflation – in Yakutia, northern Baikal and Transbaikalia, paludification – in the Central Yakut lake-alluvial plain, in the intermountain basins of Transbaikalia and North-Eastern Yakutia, in Western Siberia, cryosolifluction and thermokarst – in Central and Northern Yakutia, Krasnoyarsk Krai, Magadan Oblast, and in the north of Amur Oblast.

Keywords: forest fires; Landsat images; forest soils; post-pyrogenic trends; regional forecasts.

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия масштабы возникновения и распространения пожаров характеризуются значительным ростом по количеству возгораний и территории охвата. За период с 2000 по 2021 гг. общая площадь пожаров в России выросла на 10–15% и составила 2–2.5 млн га (Экологический атлас, 2017; Основные показатели..., 2023). Этот негативный тренд обусловлен как природными, так и антропогенными факторами.

Глобальное потепление климата существенно изменило ситуацию на территории Российской Федерации, где оно в значительной степени способствовало активизации различного рода атмосферных процессов и явлений, вызывающих усиление грозовой активности, приводящей к резкому возрастанию сухих гроз – одной из важных причин возгорания и возникновения пожаров. Антропогенная активность – разведение костров, палы травы также приводят к возникновению пожаров. Недостаточное внимание к мерам по санитарной очистке леса, несовершенство инфраструктуры и ограниченная возможность пожаротушения в связи с недостатком коммуникаций прямо или косвенно влияют на частоту и масштабы возгораний. Особенно велика доля антропогенно-инициированных пожаров в азиатской части России; в среднем она составляет около 60% (Белов, 1976).

Особую опасность пожары представляют для лесов бореального пояса, занимающих более 40% территории РФ.

Ущерб, наносимый лесам от пожаров, традиционно принято оценивать территориально в единицах площади, отражающих масштабы этого явления и позволяющих характеризовать те или иные регионы с точки зрения подверженности биогеоценозов пирогенной деструкции (Краснощеков, 2018).

В подходах к изучению влияния пожаров на почвенный покров доминируют два направления, первое из которых связано с пространственной характеристикой этого явления. Возможно, по этой причине исследователи долгое время уделяли мало внимания процессам, затрагивающим почвенный профиль, делая акцент на выгорании подстилки и разрушении структуры органофила в зонах распространения пожаров (Wildland fire in..., 2005). Второе

направление охватывает спектр исследований, касающихся процессов постпирогенной деградации почв. На фоне разрушения верхних органических и органо-минеральных горизонтов развиваются эрозионные процессы (водная эрозия, дефляция) (Dunkerley et al., 2009, Десяткин и др., 2024), а также в той или иной мере переувлажнение и заболачивание, возникающие в результате резкого ослабления транспирации и нарушения водного режима, сопровождающих лесные пожары (Чевычелов, 2002). Кроме того, в криолитозоне может наблюдаться усиление процессов солифлюкции, приводящих к изменению структуры почвенного покрова и трансформации почвенных профилей (Тарабукина, Саввинов, 1990). Нередко постпирогенные явления способны вызывать активизацию термокарста (Попова, 1997).

В данной работе карты вероятных постпирогенных трендов деградации почв в результате исчезновения леса основаны на комплексном анализе контурной и содержательной основы Единого государственного реестра почвенных ресурсов России (ЕГРПР, 2014) и данных спутниковой съемки об исчезновении лесов из-за мощных верховых пожаров за период с 2000–2021 гг. Полученные путем экспертной оценки пространственные закономерности активизации различных видов постпирогенной деградации почв привязаны к полигонам ЕГРПР и при этом расширяют возможности инвентаризации лесных почв, регулярно страдающих от пожаров (по статистике, раз в 40–50 лет (Валендик, 1990)), а также обеспечивают прогноз изменений условий функционирования почв на территории всей России.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследований являются почвы и почвенный покров лесной зоны России, отображенные на Почвенной карте РСФСР масштаба 1 : 2.5 млн под редакцией В.М. Фридланда (ПКРФ), являющейся основой Единого государственного реестра почвенных ресурсов России (ЕГРПР..., 2014). Почвы оценивались с точки зрения их вероятной подверженности различным деградационным процессам в результате постпирогенного исчезновения леса за период с 2000 по 2021 гг.

В качестве основы для выделения ареалов исчезновения лесов использовались карты ежегодной динамики лесов за период с 2000 по 2021 гг., построенные специалистами лаборатории GLAD Университета Мэриленд (США) по спутниковым данным Landsat (Hansen, et al., 2013; <https://data.globalforestwatch.org/documents/941f17325a494ed78c4817f9bb20f33a/explore>). Все ежегодные карты обезлесивания на территорию России были просуммированы, и получена карта с пространственным разрешением 30 м, на которой показаны участки лесов, которые исчезли за период с 2000 по 2021 гг.

Далее эти участки были разделены на три класса: 1-й – где причиной исчезновения леса явились вырубки, 2-й – где исчезновение леса связано с пожарами, и 3-й – где отсутствие леса обусловлено одновременно и вырубками, и пожарами. Это разделение базировалось на визуальном дешифрировании ареалов с исчезнувшей лесной растительностью в каждом выделе ПКРФ. Массивы вырубок отделялись по небольшим ареалам, правильной, чаще прямоугольной формы, светлых тонов, с ровными, четкими границами, расположенным в определенном порядке чередования с лесными участками. Ареалы неправильной формы, относительно темной, бурой и черной окраски, с языковатыми и изорванными границами интерпретировались по аналогии с представлениями Данюлиса с соавт. (1989) как постпожарные. В случае высокой неопределенности массив исчезнувшего леса классифицировался как смешанный (исчезновение леса и от вырубок, и от пожаров).

После дешифрирования трех классов для каждого полигона ПКРФ был посчитан процент лесов, уничтоженных пожарами за указанные 20 лет, который являлся критерием разделения деградационных процессов на классы вероятности. Затем был проведен экспертный анализ рисков активизации процессов деградации лесных почв по конкретным полигонам на карте с учетом преобладающих уклонов местности, гранулометрического состава, присутствия многолетнемерзлых пород и других свойств почв (эта информация является атрибутивной в ЕГРПР (Единый ..., 2014)). Оценивались риски развития водной и ветровой эрозии почв, вторичного заболачивания и криогенных процессов в зоне распространения многолетнемерзлых пород.

Анализ пространственной информации и картографическая визуализация результатов были осуществлены с использованием ГИС ILWIS v.3.3 и QGIS v.3.36.1. С целью повышения информативности анализа названия почв приведены в терминах классификации и диагностики почв России (КиДПР) в двух ее версиях (Классификация..., 2004; Полевой определитель..., 2008; Ананко и др., 2017). В скобках курсивом даны названия почв в легенде ПКРФ.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 1 представлена карта ареалов лесопотерь в результате пожаров и вырубок на постпирогенных почвах. На карте выделены три зоны: 1) территории, не затронутые пожарами; 2) территории с потерей леса в результате пожаров; 3) территории с потерей леса от совместного действия пожаров и вырубок (рис. 1).

Ареалы с постпирогенной потерей леса (вторая зона) занимают около 16% территории России (без учета новых регионов). Они сосредоточены преимущественно в Заенисейской Сибири и на Дальнем Востоке, образуя зоны сплошного исчезновения лесов. Это огромные территории Средне-Сибирского плоскогорья, равнин и возвышенностей Центральной Якутии, горных хребтов, плато и нагорий Предбайкалья, Забайкалья, Северной Якутии и Дальнего Востока. Их почвенный покров состоит преимущественно из маломощных щебнистых почв, относящихся в системе КиДПР (2004, 2008) к отделам альфегумусовых, органо-аккумулятивных и железисто-метаморфических, слаборазвитых почв и литоземов, уязвимых к процессам эрозии, а также мелкоземистых льдисто-мерзлотных почв отделов палево-метаморфических почв, криоземов и глееземов, в которых после пожаров активизируются криогенные процессы солифлюкции, термокарст и заболачивание. В Западно-Сибирском регионе основные массивы возможной постпирогенной деструкции почв расположены в лесотундре и северной тайге с преобладающими здесь глееземами; южнее к ним присоединяются текстурно-дифференцированные почвы с разной степенью и локализацией оглеения в профиле. Большие площади Западной Сибири, пострадавшие от пожаров, представлены аль-

фегумусовыми почвами.



Рис. 1. Ареалы лесопотерь в результате пожаров и совместного воздействия пожаров и вырубок.

-  - территории, не затронутые пожарами
-  - территории с потерей леса в результате пожаров
-  - территории с потерей леса в результате пожаров и рубок

Fig. 1. Areas of forest loss as a result of fires and the combined action of fires and forest cutting:

-  - territories not affected by fires
-  - territories with forest loss as a result of fires
-  - territories with forest loss as a result of fires and cutting

Около 5% от площади страны занимают территории со смешанным классом (третья зона). Они преобладают в европейской части страны, встречаются небольшими ареалами в южно-таежной подзоне Западной и Средней Сибири, в Забайкалье и на Дальнем Востоке. Им свойственна мелкоконтурность, то есть пожары имеют здесь очаговый характер, что подтверждает закономерности, установленные ранее другими авторами (Дымов и др., 2014; Дымов, 2020).

По данным проведенного анализа, ведущую роль в нарушении функционирования постпирогенных почв России играет эро-

зионное разрушение поверхностных горизонтов, которое в ряде случаев может привести к формированию смытых почв или полному уничтожению почвенного покрова.

Прогноз деградационных процессов в почвах при пожарах

1. Вероятность активизации водной эрозии. Эрозионные процессы начинают активизироваться в ходе послепожарных изменений в лесах вследствие частичного или полного уничтожения растительного покрова и образования на первом этапе постпирогенной эволюции ландшафта открытых пространств, незащищенных от водной или ветровой эрозии.

Степень эрозионной послепожарной устойчивости почв можно оценивать в трех направлениях в соответствии с климатическими поясами (широтным и высотным) и типом рельефа. По-видимому, она падает с юга на север при переходе от суббореального к бореальному, а затем к полярному поясам, где криогенные процессы изначально определяют податливость почв к разрушению даже при незначительных воздействиях и крайне медленное самовосстановление в ходе сукцессионных преобразований. Не исключено, что с учетом сходной геоморфологической ситуации вероятное нарастание эрозии будет происходить в ряду: от почв лесостепей и смешанных лесов через почвы южной и средней тайги к почвам северной тайги и лесотундры. Почвы горных лесов также можно ранжировать по предположительному убыванию устойчивости (при одинаковой склоновой крутизне) на почвы лиственных, смешанных и хвойных древесных формаций.

Важным фактором, связанным с климатическим разнообразием подверженных пожарам регионов, является скорость и характер зарастания гарей. Напочвенный покров из трав в большинстве случаев образуется в лиственных лесах на 2–3-й год, в разы снижая вероятность развития эрозии, в смешанных лесах – через 3–5 лет, в то время как в хвойных для формирования лишайниково-мохового слоя требуются десятилетия (Краснощеков, Чередникова, 2022).

Крутизна склонов в сочетании с особенностями лесных ландшафтов в ходе постпирогенных преобразований играет, по сути, основную роль в горах, во многом корреспондируя с высотной поясностью, увеличиваясь от низкогорий к средне- и верхнегорьям.

На основе информации, имеющейся в ЕГРПР о крутизне склонов, экспертно было выделено несколько категорий вероятной послепожарной водной эрозии почв (табл. 1).

Таблица 1. Вероятность активизации эрозии на постпирогенных лесных почвах в зависимости от крутизны склонов

Table 1. The probability of increased erosion on post-pyrogenic forest soils depends on the steepness of the slopes

Преобладающая крутизна склона, градусы	Вероятность активизации эрозионных процессов в почвах
0–2	Отсутствует
2–5	Очень низкая
5–8	Низкая
8–15	Средняя
15–30	Высокая
Более 30	Очень высокая

На основе данных таблицы 1 построена карта вероятности развития водной эрозии почв в результате уничтожения леса (рис. 2).

В соответствии с картой, площади с разной интенсивностью вероятной водной эрозии (см. подписи к рис. 2) составляют от общей площади России:

- c1 – 1.11%
- c2 – 2.36%
- c3 – 0.57%
- c4 – 2.05%
- c5 – 3.12%
- c6 – 0.84%

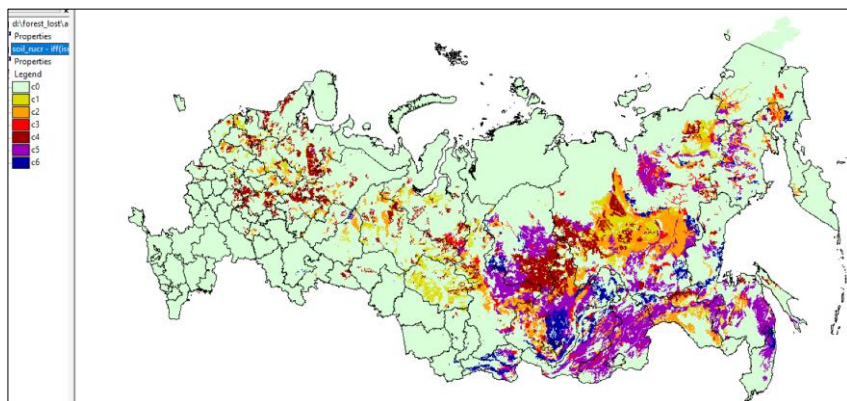


Рис. 2. Вероятность развития водной эрозии в результате уничтожения леса пожарами (с0 – нет постпирогенных лесных почв, с1 – эрозия отсутствует, с2 – очень низкая, с3 – низкая, с4 – средняя, с5 – высокая, с6 – очень высокая (катастрофическая)).

Fig. 2. Probability of water erosion as a result of post-fire forest destruction (с0 – no post-fire forest soils, с1 – absent, с2 – very low, с3 – low, с4 – medium, с5 – high, с6 – very high (catastrophic)).

Наиболее крупные массивы почв с высокой и очень высокой степенью эрозионной опасности приурочены к плато и горам Средней и Восточной Сибири, Забайкалья и Дальнего Востока. На Центрально-Тунгусском плато и плато Сыверма в пределах Средне-Сибирского плоскогорья – это подбуры охристые и торфяно-криоземы криогомогенные (*подбуры охристые и таежные торфянисто-перегнойные высокогумусные неоглеенные*) разреженных лиственных лесов на плотных породах основного состава. Южнее, на Лено-Ангарском плато, Енисейском кряже, в горах и плато Предбайкалья и Северного Забайкалья, где выявлена самая высокая степень риска послепожарной водной эрозии, преобладают маломощные литоземы и карболитоземы, грубогумусовые и темногумусовые остаточно-карбонатные почвы (*дерново- и перегнойно-карбонатные*), а также подзолы и подбуры иллювиально-гумусовые и иллювиально-железистые (*подбуры темные таежные и подбуры светлые таежные*), ржавоземы, в том числе

грубогумусовые (*дерново-таежные железистые и буро-таежные*) и петроземы (*горные примитивные*) под темнохвойными и светлохвойными лесами на плотных породах. В горах Южной Сибири – в зоне высокого и очень высокого риска послепожарной водной эрозии – к зональным почвам горно-таежного пояса присоединяются почвы лиственнично-березовых травяных лесов – перегнойно-темногумусовые надмерзлотно-глееватые (*горные лесо-луговые*), а также почвы лесостепной зоны, определенные по классификации почв России как перегнойно-темногумусовые метаморфизованные, в том числе натечно-карбонатные (*серые лесные неоподзоленные*), формирующиеся на периферии степных котловин на породах различного состава. На склонах хребтов Черского и Верхоянского интенсивным процессам водной послепожарной эрозии могут подвергаться сухоторфяно-литоземы, литоземы грубогумусовые палево-метаморфизованные (*палевые перегнойные*), сухоторфяно-подбуры, торфяно-криоземы криогомогенные; на Дальнем Востоке, в горах Сихотелина – характерные для таежного пояса этого региона ржавоземы грубогумусовые и иллювиально-гумусированные (*буро-таежные и буро-таежные иллювиально-гумусовые*).

В Центральной Якутии на слаборасчлененной озерно-аллювиальной равнине степень эрозионной опасности после исчезновения леса невелика или отсутствует. Она возрастает до средней и высокой к западу и северо-западу на Приленском и Вилюйском плато и к востоку – на Алданском плато с увеличением глубины и степени расчленения рельефа. Среди эрозионно-опасных почв здесь преобладают карболитоземы грубогумусовые и темногумусовые, грубогумусовые палево-метаморфизованные, в том числе, оподзоленные (*палевые типичные и оподзоленные*).

Исчезновение лесов в результате пожаров в горных условиях нередко приводит к полному уничтожению почвенного покрова на склонах, образованию селевых потоков, нарушающих почвенный покров в долинах и на подгорных равнинах (Рожков, 2007).

На территории северо-западной и центральной частей Восточно-Европейской равнины, а также центральной части Западной Сибири в зону преимущественно слабой степени вероятности эрозионной опасности попали подзолистые и дерново-подзоли-

тые почвы с различной локализацией оглеения профиля и глубины оподзоленности, а также со вторыми гумусовыми горизонтами, подзолы и дерново-подзолы иллювиально-железистые, серые и темно-серые почвы.

Таким образом, примерно на 9% территории страны в результате уничтожения лесов из-за пожаров в период с 2000 по 2021 год, возможно усиление процессов водной эрозии почв, причем примерно на половине ее вероятность оказалась высокой и очень высокой.

2. Вероятность активизации дефляции почв. Активизация дефляционных процессов в почвах в результате послепожарного исчезновения леса наиболее вероятна в регионах с засушливым климатом и преобладанием в почвенном покрове легких почв.

Составленная карта демонстрирует приуроченность максимального развития дефляционных процессов к горным массивам и возвышенным территориям Енисейского кряжа, Северного Прибайкалья и Забайкалья, террасам Лены в пределах Линде-Виллюй-Ленского междуречья (рис. 3).



Рис. 3. Вероятность развития дефляции почв в результате постпожарного уничтожения леса

Fig. 3. Probability of soil deflation in areas with tree cover destroyed by fires.

В почвенном покрове здесь значительно участие легких почв: подзолов, подбуров, ржавоземов; в Центральной Якутии в зону риска попали также грубогумусовые палево-метаморфизованные оподзоленные почвы (*палевые оподзоленные на легких породах*), а в Западной Сибири и в европейской России подзолы и дерново-подзолы средней и южной тайги, псаммоземы (*боровые пески*) и дерново-подзолистые почвы на двучленах с легким верхним наносом. В азиатской части страны доля почв в полигонах с высокой вероятностью дефляции варьирует от 5% до 40%. Для европейской России этот вид деградации незначителен.

вероятность менее 5% –	4.34
вероятность 5–10% –	2.61
вероятность 10–20% –	0.98
вероятность 20–30% –	0.39
вероятность 30–40% –	0.10
вероятность 40–50% –	0.06
вероятность 50–60% –	0.04
вероятность 60–70% –	0.03
вероятность выше 70% –	0.00

Таким образом, доля площади почв, где существует в той или иной степени вероятность дефляции в результате уничтожения лесов пожарами в период с 2000 по 2021 гг. составляет около 8% от площади страны. Причем большая ее часть характеризуется вероятностью менее 5%.

3. Вероятность вторичного заболачивания. Развитие послепожарного заболачивания во многом определяется длительностью восстановления растительных сукцессий. В наибольшей мере постпирогенное заболачивание происходит в криолитозоне на почвах тяжелого гранулометрического состава. По данным Петрова (2023), термическое воздействие пожаров приводит к усилению процессов деградации кровли вечной мерзлоты, что усиливает эффект заболачивания почв. Чем меньше мощность сезонного талого слоя и больше льдистость мерзлоты, тем длительнее экосистема функционирует в режиме повышенной увлажненности за счет потери транспирации.

Наиболее высокая степень вероятного постпирогенного заболачивания почв наблюдается на Центрально-Якутской равнине. В почвенном покрове здесь преобладают палевые, палевые осолоделые (*палевые карбонатные и палевые осолоделые*) и палевые темногумусовые почвы (*серопалевые*). Почвы характеризуются льдистой мерзлотой, замыкающей профиль, с глубиной оттаивания от 130 см в палевых осолоделых почвах до 100 см – в палевых и 50–80 см – в гидроморфных глеевых почвах. Доля почв с высокой степенью развития заболачивания, по данным анализа, для этой территории составляет в некоторых выделах ЕГРПР до 40–50%, а в отдельных случаях достигает 80–90% (рис. 4). К северу и югу, на расчлененных междуречьях рек, сложенных плотными осадочными породами, она снижается.

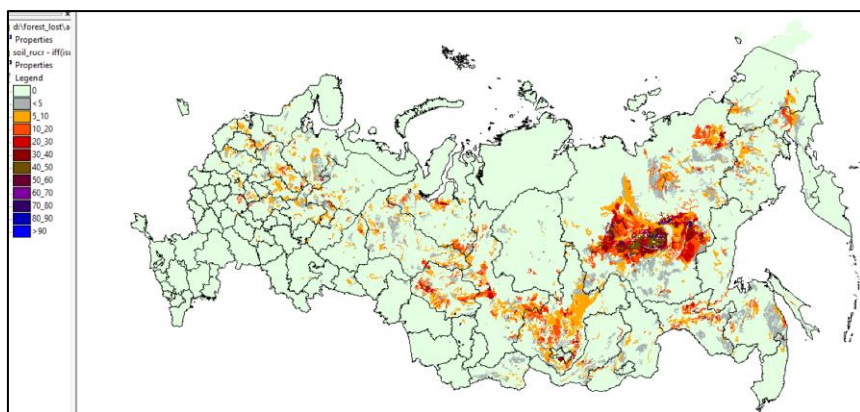


Рис. 4. Вероятность развития заболачивания на почвах в результате постпирогенного уничтожения леса.

Fig. 4. Probability of waterlogging development after fires.

Существенное распространение заболачивания не исключено и в горных котловинах Восточного Забайкалья и Северо-Восточной Якутии, где в почвенном покрове преобладают глееземы или криоземы глееватые перегнойные и торфянисто-перегнойные.

За пределами криолитозоны вероятность заболачивания (10–30%) отмечена в подтайге Западной Сибири на различных исходно переувлажненных почвах: перегнойно-темногумусовых и перегнойных глееватых и глеевых и их оподзоленных аналогах (*дерново- и перегнойно-глеевых, в том числе оподзоленных*), перегнойно-торфянисто-глеевых и торфянисто-подзолисто-глеевых почвах, подзолах глеевых, а в лесотундре и северной тайге – на торфяно-глееземах, глееземах торфянисто-перегнойных и светлоземах глееватых (*таежные глеево-дифференцированные*).

В соответствии с картой, площади выделов ЕГРПР разных классов вероятности составляют от площади страны:

вероятность менее 5% –	4.98
вероятность 5–10% –	5.28
вероятность 10–20% –	2.85
вероятность 20–30% –	0.97
вероятность 30–40% –	0.53
вероятность 40–50% –	0.33
вероятность 50–60% –	0.14
вероятность 60–70% –	0.03
вероятность 70–80% –	0.04
вероятность 80–90% –	0.03
вероятность более 90% –	0.00

Таким образом, доля почв, где существует в той или иной степени вероятность вторичного заболачивания почв в результате уничтожения лесов пожарами в период с 2000 по 2021 гг., составляет около 15%; для большей части территории она не превышает 20%.

Так или иначе, ведущим фактором развития заболачивания остается длительность пребывания нарушенного пожаром биогеоценоза без древесной растительности.

Криогенные процессы

4. Вероятность активизации солифлюкции. Солифлюкция может значительно усиливаться при постпирогенном исчезновении древесной и кустарниковой растительности и деструкции

верхнего органогенного и/или гумусового горизонта (Романовский, 1993).

В результате солифлюкции нарушается естественная мезо- и микроструктура почвенного покрова за счет формирования солифлюкционных террас, валов, потоков в нижних частях склонов и уничтожения почв в других его частях, в результате чего образуются голые пятна, лишенные растительности, которые, сливаясь, образуют солифлюкционные полосы. С солифлюкцией связаны полосчатые линейные формы рельефа – делли, широко распространенные на щебнисто-суглинисто-глинистом делювии плотных пород (Романовский, 1993).

На основании анализа наиболее благоприятных факторов протекания солифлюкции (наличие мерзлотного водоупора на глубине 70–120 см, высокой влажности и тяжелого гранулометрического состава почв, уклонов поверхности от 2–3° до 10–15° и нарушенного органогенно-гумусового верхнего горизонта (Романовский, 1993; Мажитова, 2000; Тарабукина, Саввинов, 1990) была составлена прогнозная карта вероятности активизации процессов солифлюкции в таежных почвах после пожарного уничтожения леса (рис. 5).

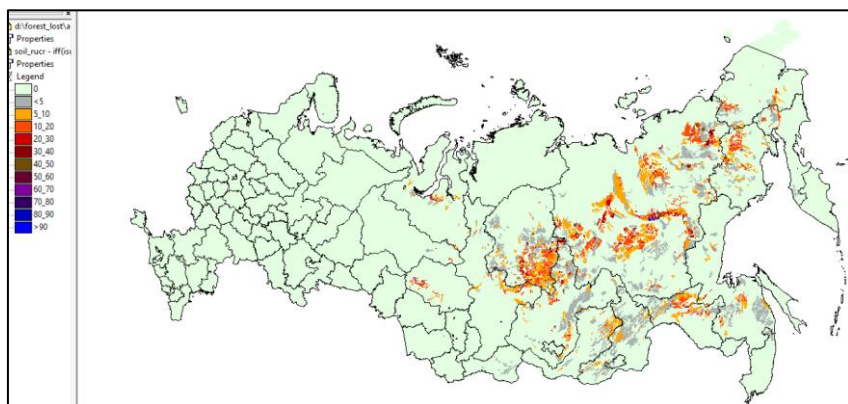


Рис. 5. Вероятность развития солифлюкции на почвах в результате постпирогенного уничтожения леса.

Fig. 5. Probability of solifluction development after fires.

К основным регионам возможного развития солифлюкции относится Якутия. Так, на слабо расчлененных поверхностях Центрально-Якутской равнины солифлюкция может протекать на пологих протяженных склонах, занятых палевыми и палевыми осолоделыми почвами (*палевые карбонатные и палевые осолоделые*), на более расчлененных Приленском и Лено-Алданском плато – грубогумусовыми палево-метаморфизованными и их оподзоленными аналогами (*палевые типичные и палевые оподзоленные*), для которых характерны органогенные и гумусовые горизонты небольшой мощности, а глубина оттаивания льдистой мерзлоты не превышает 80–120 см. На Оленекском и Вилуйском плато, на склонах крутизной 5–8°, на тяжелосуглинистом и глинистом льдистом делювии плотных карбонатных пород формируются криоземы грубогумусовые глееватые остаточно-карбонатные с глубиной оттаивания 70–90 см. Именно для этих плато характерно широкое развитие солифлюкционных пятен, полос и деллей на склонах. Также на карте отмечены обширные территории на северо-востоке Якутии, в Магаданской области, на севере Амурской области и в Забайкалье, где вероятность солифлюкционных процессов связана со склонами, перехватывающими влагу, и близкой льдистой мерзлотой, на которых преобладают мелкоземистые почвы – глееземы и криоземы глееватые торфянисто-перегнойные. На севере Западной Сибири вероятность активизации процессов солифлюкции привязана к наиболее дренированным приречным склонам с глееземами оподзоленными или светлоседами глееватыми. Все перечисленные регионы расположены в пределах криолитозоны.

В соответствии с картой, площадь выделов ЕГРПР разных классов вероятности активизации солифлюкции от площади страны составляет:

вероятность менее 5% –	4.78
вероятность 5–10% –	2.64
вероятность 10–20% –	1.91
вероятность 20–30% –	0.40
вероятность 30–40% –	0.14
вероятность 40–50% –	0.06
вероятность 50–60% –	0.01

вероятность 60–70% –	0.01
вероятность 70–80% –	0.01
вероятность 80–90% –	0.00
вероятность более 90% –	0.00

Таким образом, доля площади почв, где в той или иной степени существует вероятность активизации процесса солифлюкции в результате уничтожения лесов пожарами в период с 2000 по 2021 гг., составляет около 10% от площади страны. Однако вероятность ее возникновения невелика и для большей части территории не превышает 20%.

5. Вероятность активизации термокарста. Явления термокарста напрямую связаны с процессами протаивания высокольдистых отложений и подземных льдов, в результате которых происходит просадка поверхности и возникновение отрицательных форм мезо- и микрорельефа (Романовский, 1993). Постпирогенные явления могут создавать временно благоприятные условия для активизации проседания грунтов, благодаря сочетанию термического эффекта с выгоранием органической толщи (Петров, 2023).

В большей мере проявления постпирогенного термокарста могут наблюдаться на равнинах, в долинах горных рек, межгорных впадинах. Судя по карте, территориально зона наиболее яркого проявления этого процесса приходится на регионы Центрально-Якутской депрессии с распространенными здесь палевыми и палевыми осолоделыми почвами, межгорных впадин Верхояно-Чукотской горной области и террас Лены с господствующими в почвенном покрове глееземами и криоземами, где воздействие пожаров имеет место в сочетании с высокольдистой вечной мерзлотой. В меньшей степени термокарстовым явлениям подвержены регионы Магаданской области и севера Амурской области, где вероятная постпирогенная нарушенность почв не превышает 5% (рис. 6).

В целом по России площади территорий разных классов вероятности активизации термокарста составляют от общей площади страны:

вероятность менее 5% –	3.04
вероятность 5–10% –	1.96

вероятность 10–20 % –	1.43
вероятность 20–30 % –	0.44
вероятность 30–40 % –	0.19
вероятность 40–50 % –	0.08
вероятность 50–60 % –	0.02
вероятность 60–70 % –	0.02
вероятность 70–80 % –	0.01
вероятность 80–90 % –	0.00
вероятность более 90% –	0.00

То есть доля площади почв, где существует в той или иной степени вероятность активизации термокарста в результате уничтожения лесов пожарами в период с 2000 по 2021 гг. составляет около 7% от площади страны.

Безусловно, полученные данные достаточно схематичны в связи с использованием в качестве основы для анализа Почвенной карты масштаба 1 : 2 500 000. При появлении почвенных карт на всю территорию России более крупного масштаба подобный анализ может быть проведен на более детальном уровне. Но в ближайшие десятилетия такая возможность вряд ли появится.

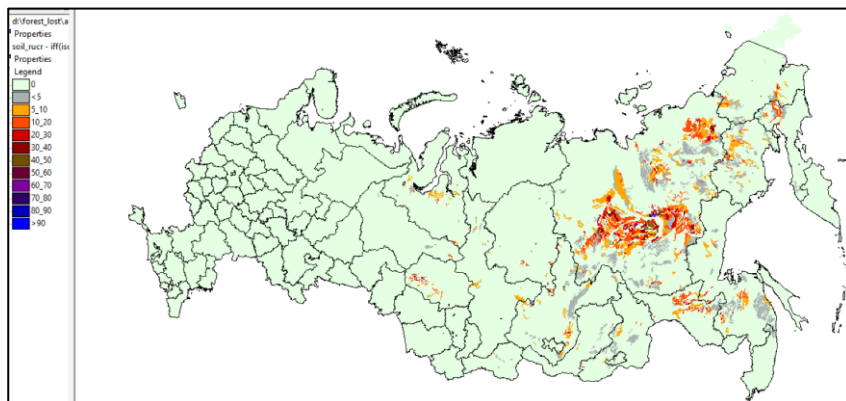


Рис. 6. Вероятность развития термокарста на территориях с уничтоженным пожарами древесным покровом.

Fig. 6. Probability of thermokarst development in the areas with tree cover destroyed by fires.

ВЫВОДЫ

1. Полученная информация об исчезновении лесов в период 2002–2021 гг. подтверждает известное положение о преимущественном уничтожении лесов пожарами в азиатской части страны (до 70%), включая значительную часть территории криолитозоны (до 30%).

2. Проведенная поконтурная диагностика позволила получить количественную информацию о возможной пространственной затронутости каждого полигона Почвенной карты масштаба 1 : 2.5 млн пожарами и последующей активизации процессов постпирогенной деградации почв, которая может проявляться на 16% территории страны.

3. Высокая и очень высокая вероятность развития процессов водной эрозии вплоть до уничтожения почвенного покрова в результате постпирогенного исчезновения леса существует на 4% территории страны: в горах и на плато Предбайкалья, Забайкалья, Северо-Восточной Якутии, в Западном Саяне, на юге Дальнего Востока на преобладающих здесь маломощных щебнистых почвах: подбурах, подзолах, ржавоземах, литоземах, грубогумусовых остаточно-карбонатных почвах.

4. Высокая вероятность развития постпирогенного процесса заболачивания существует в пределах криолитозоны на равнинах Центральной Якутии, в межгорных впадинах и на равнинах Северо-Восточной Якутии, Предбайкалья, на преобладающих здесь тяжелосуглинистых и глинистых почвах с неглубокой льдистой мерзлотой: глееземах, криоземах, палевых почвах, а также вне криолитозоны, в южной и средней тайге восточной части Западно-Сибирской низменности на глееватых и глеевых недифференцированных и текстурно-дифференцированных почвах. Общая площадь таких почв составляет около 0.6% территории страны

5. На базе экспертной оценки и составленных на ее основании прогнозных карт деградации почвенного покрова вследствие лесных пожаров получен ряд убывания процессов по их интенсивности и масштабам изменений ими почвенных свойств: водная эрозия > заболачивание > дефляция > термокарст > солифлюкция.

5. Согласно проведенному анализу только от пожаров 2000–

2021 гг. вероятность активизации разнообразных деградационных процессов в результате уничтожения лесов пожарами проявляется в 25.4% контуров ЕГРПР, причем для многих из них высока вероятность активизации сразу нескольких видов деградационных процессов. Это дополняет информационную картину результатов негативного влияния исследованных факторов на почвы и почвенный покров страны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ананко Т.В., Герасимова М.И., Конюшков Д.Е.* Опыт обновления Почвенной карты РСФСР масштаба 1 : 2.5 млн в системе классификации почв России // Почвоведение. 2017. № 12. С. 1411–1420.
2. *Белов С.В.* Лесная пирология. Л., 1976. 63 с.
3. *Валендик Э.Н.* Борьба с крупными лесными пожарами // Новосибирск: Наука, 1990. 191 с.
4. *Десяткин Р.В., Николаева М.Х., Иванова А.З., Десяткин А.Р., Оконешникова М.В., Филиппов Н.В.* Влияние крупных лесных пожаров 2021 года на растительность и почвы на территории распространения легких почвообразующих пород Центральной Якутии // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2024. Вып. 118. С. 231–275. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2024-118-231-275>.
5. *Данюлис Е.П., Журинов В.М., Сухих В.И., Эльман Р.И.* Дистанционное зондирование в лесном хозяйстве. М.: Агропромиздат, 1989. 222 с.
6. *Дымов А.А., Дубровский Ю.А., Габов Д.Н.* Пирогенные изменения подзолов иллювиально-железистых (средняя тайга, Республика Коми) // Почвоведение. 2014. № 2. С. 144–154. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0032180X14020051>.
7. *Дымов А.А.* Сукцессии почв в бореальных лесах Республики Коми. М.: Изд-во ГЕОС, 2020. 336 с. DOI: <https://doi.org/10.34756/GEOS.2020.10.37828>.
8. Единый государственный реестр почвенных ресурсов России (гл. ред. *А.Л. Иванов, С.А. Шоба*). М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 2014. 760 с.
9. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 341 с.
10. *Краснощёков Ю.Н.* Почвы горных лесов Прибайкалья и их трансформация под влиянием пожаров // Почвоведение. 2018. № 4. С. 387–401. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0032180X18040019>.
11. *Краснощёков Ю.Н., Черединова Ю.С.* Постпирогенная изменчивость

- лесных почв в горном Прибайкалье. Новосибирск: СО РАН, 2022. 164 с.
12. *Мажитова Г.Г.* Пирогенная динамика мерзлотных почв Колымского нагорья (Магаданская область) // Почвоведение. 2000. №5. С. 619–629.
13. Полевой определитель почв России. М.: Почв. ин-т им В.В. Докучаева, 2008. 182 с
14. Основные показатели охраны окружающей среды / Статистический бюллетень. Федеральная служба государственной статистики (Росстат). 2023. 105 с.
15. *Петров Д.Г.* Пирогенные почвы бореальных и субарктических областей России: динамика свойств и информационная роль: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М., 2023. 27 с.
16. *Попова Э.П.* Пирогенная трансформация свойств почв Среднего Приангарья // Сибирский экологический журнал. 1997. №4. С. 413–418.
17. *Романовский Н.Н.* Основы криогенеза литосферы. М.: Наука, 1993. 335 с.
18. *Рожков В.А.* Оценка эрозионной опасности почв // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2007. Вып. 59. С. 77–91.
19. *Тарабукина В.Г., Саввинов Д.Д.* Влияние пожаров на мерзлотные почвы. Новосибирск: Наука, 1990. 119 с.
20. *Чевычелов А.П.* Пирогенез и постпирогенные трансформации свойств исоставамерзлотных поса // Сибирский экологический журнал. 2002. № 3. С. 273–278.
21. Экологический атлас России. М.: Феория, 2017. 509 с.
22. *Dunkerley D., Martin N., Berg S., Ferguson R.* Fire, catchment run-off and erosion processes, and Post-fire Rehabilitation programs: recent Australian experience // Fire Effects on Soils and Restoration Strategies / Eds. *A. Cedra, P.R. Robichaud*. Science Publishers. 2009. Vol. 5. P. 467–509. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781439843338>.
23. *Hansen M.C., Potapov P.V., Moore R., Hancher M., Turubanova S.A., Tyukavina A., Thau D., Stehman S.V., Goetz S.J., Loveland T.R., Kommareddy A., Egorov A., Chini L., Justice C.O., Townshend J.R.G.* High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change // Science. 2013. Vol. 342. P. 850–853.
24. Wildland fire in ecosystems: Effect of fire on soil and water: Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR 32-vol. 4. US Department of Agriculture / Eds. *N.G. Daniel, R.C. Kevin, D.F. Leonard* (revised 2008). Forest Service. Rocky Mountain Research Station, 2005. 250 p.

REFERENCES

1. Ananko T.V., Gerasimova M.I. Konyushkov D.E., Opyt obnovleniya

- Pochvennoj karty RSFSR masshtaba 1 : 2.5 mln v sisteme klassifikacii pochv Rossii (The experience of updating the RSFSR Soil Map on a scale of 1:2.5 million in the Russian soil classification system), *Pochvovedenie*, 2017, No. 12, pp. 1411–1420.
2. Belov S.V., *Lesnaya pirologiya* (Forest pyrology), Leningrad, 1976, 63 p.
3. Valendik E.N., *Bor'ba s krupnymi lesnymi pozharemi* (Fighting large forest fires), Novosibirsk: Nauka, 1990, 191 p.
4. Desyatkin R.V., Nikolaeva M.Ch., Ivanova A.Z., Desyatkin A.R., Okoneshnikova M.V., Filippov N.V., The impact of 2021 large forest fires on vegetation and soils, on the territory of distribution of light soil-forming rocks in Central Yakutia, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2024, No. 118, pp. 231–275. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2024-118-231-275>.
5. Danyulis E.P., Zhirin V.M., Sukhikh V.I., El'man R.I., *Distsionnoe zondirovanie v lesnom khozyaistve* (Remote sensing in forestry), Moscow: Agropromizdat, 1989, 222 p.
6. Dymov A.A., Dubrovskii Yu.A., Gabov D.N., Pirogennye izmeneniya podzolov illuvial'no-zhelezistyykh (srednyaya taiga, Respublika Komi) (Pyrogenic changes of illuvial-ferruginous podzols (Middle taiga, Komi Republic)), *Pochvovedenie*, 2014, No. 2, pp. 144–154.
7. Dymov A.A., *Suktsessii pochv v boreal'nykh lesakh Respubliki Komi* (Soil succession in boreal forests of the Komi Republic), Moscow: OOO “Izd-vo GEOS”, 2020, 336 p., DOI: <https://doi.org/10.34756/GEOS.2020.10.37828>.
8. *Edinyi gosudarstvennyi reestr pochvennykh resursov Rossii* (Unified State Register of Soil Resources of Russia), Moscow: Pochvennyi institut im. V.V. Dokuchaeva, 2014, 760 p.
9. *Klassifikatsiya i diagnostika pochv Rossii* (Classification and diagnostics of soils of Russia), Smolensk: Oikumena, 2004, 341 p.
10. Krasnoshchekov Yu.N., Pochvy gornykh lesov Pribaikal'ya i ikh transformatsiya pod vliyaniem pozharov (Soils of mountain forests of the Baikal region and their transformation under the influence of fires), *Pochvovedenie*, 2018, No. 4, pp. 387–401, DOI: <https://doi.org/10.7868/S0032180X18040019>.
11. Krasnoshchekov Yu.N., Cherednikova Yu.S., *Postpirogennaya izmenchivost' lesnykh pochv v gornom Pribaikal'e* (Post-pyrogenic variability of forest soils in the mountainous Baikal region), Novosibirsk: SO RAN, 2022, 164 p.
12. Mazhitova G.G., Pirogennaya dinamika merzlotnykh pochv Kolym'skogo nagor'ya (Magadanskaya oblast') (Pyrogenic dynamics of permafrost soils of the Kolyma Highlands (Magadan region)), *Pochvovedenie*, 2000, No. 5, pp. 619–629.
13. *Polevoy opredelitel' pochv Rossii* (Field guide to soils of Russia),

Moscow: Pochv. in-t im V.V. Dokuchaeva, 2008, 182 p.

14. Osnovnye pokazateli okhrany okruzhayushchei sredy (Main indicators of environmental protection), *Statisticheskii byulleten'*, 2023, 105 p.

15. Petrov D.G., *Pirogennnye pochvy boreal'nykh i subarkticheskikh oblastei Rossii: dinamika svoistv i informatsionnaya rol'*: Avtoref. diss. ... kand. geogr. nauk (Pyrogenic soils of boreal and subarctic regions of Russia: dynamics of properties and informational role: Extended abstract of Cand. geogr. sci. thesis), Moscow, 2023, 27 p.

16. Popova E.P., Pirogennnaya transformatsiya svoistv pochv Srednego Priangar'ya (Pyrogenic transformation of soil properties in the Middle Angara region), *Sibirskii ekologicheskii zhurnal*, 1997, No. 4, pp. 413–418.

17. Rozhkov V.A., Otsenka erozionnoi opasnosti pochv (Assessment of soil erosion hazard), *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2007, No. 59, pp. 77–91.

18. Romanovskii N.N., *Osnovy kriogeneza litosfery* (Fundamentals of lithospheric cryogenesis), Moscow: Nauka, 1993, 335 p.

19. Tarabukina V.G., Savvinov D.D., *Vliyanie pozharov na merzlotnye pochvy* (Impact of fires on frozen soils), Novosibirsk: Nauka, 1990, 119 p.

20. Chevychelov A.P., Pirogenез i postpirogennnye transformatsii svoistv i sostava merzlotnykh pochv (Pyrogenesis and post-pyrogenic transformations of the properties and composition of permafrost soils), *Sibirskii ekologicheskii zhurnal*, 2002, No. 3, pp. 273–278.

21. *Ekologicheskii atlas Rossii* (Ecological atlas of Russia), Moscow: Feoriya, 2017, 509 p.

22. Dunkerley D., Martin N., Berg S., Ferguson R., Fire, catchment run-off and erosion processes, and Post-fire Rehabilitation programs: recent Australian experience, *Fire Effects on Soils and Restoration Strategies*, Eds. A. Cedra, P.R. Robichaud, Science Publishers, 2009, Vol. 5, pp. 467–509, DOI: <https://doi.org/10.1201/9781439843338>.

23. Hansen M.C., Potapov P.V., Moore R., Hancher M., Turubanova S.A., Tyukavina A., Thau D., Stehman S.V., Goetz S.J., Loveland T.R., Kommareddy A., Egorov A., Chini L., Justice C.O., Townshend J.R.G., High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change, *Science*, 2013, Vol. 342, pp. 850–853.

24. Wildland fire in ecosystems: Effect of fire on soil and water, *Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR 32-vol. 4. US Department of Agriculture*, Eds. N.G. Daniel, R.C. Kevin, D.F. Leonard (revised 2008), Forest Service, Rocky Mountain Research Station, 2005, 250 p.

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2025-123-30-64



Ссылки для цитирования:

Толстыгин К.Д., Фомин Д.С., Юдина А.В., Герке К.М. Анализ гидрофизических свойств почв с использованием поросетевых моделей // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2025. Вып. 123. С. 30-64. DOI: 10.19047/0136-1694-2025-123-30-64

Cite this article as:

Tolstygin K.D., Fomin D.S., Yudina A.V., Gerke K.M., Analysis of hydrophysical properties of soils using pore-network models, Dokuchaev Soil Bulletin, 2025, V. 123, pp. 30-64, DOI: 10.19047/0136-1694-2025-123-30-64

Благодарность:

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 24-67-00026.

Acknowledgments:

This research was supported by Russian Science Foundation grant 24-67-00026.

Анализ гидрофизических свойств почв с использованием поросетевых моделей

© 2025 г. К. Д. Толстыгин^{1,2*}, Д. С. Фомин^{1**},
А. В. Юдина^{1***}, К. М. Герке^{3****}

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

*<https://orcid.org/0009-0005-1395-3745>, e-mail: kirill.tolstygin@yandex.ru,

**<https://orcid.org/0000-0003-3733-0284>, e-mail: fomin_ds@esoil.ru,

***<https://orcid.org/0000-0003-2453-3090>, e-mail: yudina_av@esoil.com.

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

³Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта, Россия,
123242, Москва, Б. Грузинская ул. 10, стр. 1,

****<https://orcid.org/0000-0002-8379-2132>, e-mail: k.gerke@digital-core.com.

Поступила в редакцию 05.12.2024, после доработки 11.03.2025,
принята к публикации 03.06.2025

Резюме: Современные физические модели почвы традиционно рассматривают поровое пространство как статичное, однако новые методы визуализации, такие как рентгеновская томография, позволили

выявить динамику структуры, которая может интенсивно изменяться под влиянием влажности и температуры. Целью работы является изучение структуры порового пространства с применением поросетевых моделей (ПСМ) и сравнение с методом основной гидрофизической характеристики (ОГХ). Работа основывалась на лабораторном эксперименте по увлажнению и иссушению образцов чернозема миграционно-мицеллярного Курской области с измерением ОГХ и параллельной регистрацией состояния почвенной структуры с использованием рентгеновской компьютерной томографии. Из 3D-изображений почв проведено выделение ПСМ, для которых проведен расчет гидрофизических свойств в масштабе пор, включая моделирование основной гидрофизической характеристики и коэффициента влагопроводности. Результаты сравнения размеров и объемов пор показывают значительное превышение объема пор, который рассчитывался на основе измерения ОГХ, по сравнению с прямым измерением геометрии по компьютерной томографии. Разница в представлении порового пространства выражается в значительных различиях моделирования влагопроводности на основе ПСМ в области низкого и высокого давления влаги (области крупных и мелких пор соответственно) по сравнению с классическим подходом на основе моделирования ОГХ с использованием уравнений ван Генухтена и ван Генухтена-Муалема. При этом кривые относительной ненасыщенной гидравлической проводимости, измеренной с использованием ПСМ и на основе ОГХ, показывают высокую степень схожести. На основании результатов работы продемонстрировано, что моделирование гидрофизических свойств почвы с применением ПСМ является крайне перспективным подходом и имеет потенциал более надежного инструмента для моделирования движения влаги, чем классический подход на основе описания ОГХ уравнением ван Генухтена. Однако фундаментальные различия между методами оставляют открытым ряд вопросов, требующих ответа прежде, чем метод моделирования гидрофизических свойств почв на основе ПСМ будет широко использоваться.

Ключевые слова: поросетевые модели; основная гидрофизическая характеристика; уравнение ван Генухтена-Муалема; микротомография.

Analysis of hydrophysical properties of soils using pore-network models

© 2025 K. D. Tolstygin^{1,2*}, D. S. Fomin^{1**},
A. V. Yudina^{1***}, K. M. Gerke^{3****}

¹*Federal Research Centre “V.V. Dokuchaev Soil Science Institute”,
7 Bld. 2 Pyzhevskiy per., Moscow 119017, Russian Federation,
* <https://orcid.org/0009-0005-1395-3745>, e-mail: kirill.tolstygin@yandex.ru,
** <https://orcid.org/0000-0003-3733-0284>, e-mail: fomin_ds@esoil.ru,
*** <https://orcid.org/0000-0003-2453-3090>, e-mail: yudina_av@esoil.com.*

²*Lomonosov Moscow State University,
1 Leninskie Gori, Moscow 119234, Russian Federation.*

³*Schmidt Institute of Physics of the Earth,
1 Bld. 10 B. Gruzinskaya Str., Moscow 12324210, Russian Federation,
**** <https://orcid.org/0000-0002-8379-2132>, e-mail: k.gerke@digital-core.com.*

Received 05.12.2024, Revised 11.03.2025, Accepted 03.06.2025

Abstract: Modern soil physical models traditionally consider the pore space as static; however, new visualization techniques, such as X-ray tomography, have revealed structural dynamics that can intensively change under the influence of moisture and temperature. The aim of this study is to investigate the structure of the pore space using pore network models (PNMs) and to compare them with the method of the water retention curve (WRC). The study was based on the laboratory experiment involving the wetting and drying of samples of Haplic Chernozem from the Kursk region, with measurements of WRC and registration of the soil structure state using X-ray computed tomography (XCT). From the 3D soil images, PNMs were extracted, for which hydrophysical properties were calculated, including modeling of the WRC and the water conductivity. The comparison of pore sizes and volumes shows a significant excess of the pore volume calculated based on WRC measurements, compared to direct geometry measurements by XCT. The difference in the representation of the pore space is expressed through significant differences in modeling of water conductivity based on PNMs in the regions of low and high capillar pressure (large and small pore sizes, respectively) compared to the approach based on WRC modeling using the van Genuchten and van Genuchten-Mualem equations. However, the curves of relative unsaturated hydraulic conductivity measured using PNMs and based on WRC show a high degree of similarity. Based on the results of the study, it was demonstrated that modeling soil hydrophysical properties using PNMs is a highly promising approach and has the potential to be a more reliable tool for modeling water dynamics than the approach based on describing WRC using the van Genuchten equation. Nevertheless, the fundamental differences

between the methods leave several questions open that require answers before the widespread use of PNMs for calculation of soil hydrophysical properties.

Keywords: pore network models; water retention curve; van Genuchten-Mualem equation; microtomography.

ВВЕДЕНИЕ

Структура почвы и ее порового пространства – фундаментальная характеристика, которая оказывает влияние на физические (Miranda-Velez et al., 2023), химические (Vogel et al., 2022) и биологические (Gui-Yuan, Hao-Ming, 2014) свойства почвы. Структура почвы оказывает важнейшее влияние на сельскохозяйственные свойства почвы и играет важную роль в перемещении и запасании влаги (Vogel et al., 2022), усвоении почвой удобрений (Bronick, Lar, 2005), эмиссии газов (Ball, 2013) и секвестрации углерода (Kay, 2018; Rabot et al., 2018).

Концептуальные модели, использующиеся в современной физике почв, предполагают, что структура порового пространства является статичной и именно в таком представлении используется в моделировании гидрофизических свойств (Van Genuchten, 1980; Шеин, 2005; Radcliffe, Simunek, 2018). Развитие новых методов визуализации и изучения почвенной структуры, включая рентгеновскую компьютерную томографию, позволило продвинуться в понимании ее динамики. Недавние эксперименты показывают, что структура почвы может подвергаться изменениям вплоть до нескольких раз в течение суток в результате изменения влажности (Fomin et al., 2023), колебаний температур (Tolstygin et al., 2025) и т. д. Высокая динамичность почвенной структуры заставляет задать вопрос: что почвенная структура представляет из себя *per se*, то есть как и каким образом структура порового пространства выглядит в текущий момент времени?

Почвенная структура описывается различными способами, которые учитывают функциональные, геометрические, пространственные свойства объекта (Шеин, 2005). В смежных с почвоведением областях науки: геофизике, геологии, нефтегазовом деле, структуру порового пространства пород представляют в виде графа, в котором вершины графа соответствуют порам, а ребра – тонким вытянутым пустотам или каналам, связывающим поры

(Lenormand et al., 1983). С развитием компьютерной рентгеновской томографии стало возможным исследовать непосредственную структуру горных пород, появились методы извлечения графов, называемых поросетевыми моделями (Zubov et al., 2022). Первые исследования по работе с пористыми средами в формате графов были проведены в восьмидесятих годах прошлого столетия (Lenormand et al., 1983). Подобное представление кажется заведомо более приближенным к реальности, поскольку позволяет учитывать структуру образца в текущий момент времени и сравнивать структуры образцов в разных состояниях.

Поросетевые модели пористых сред – это представление порового пространства пористого тела в виде связанного графа, где вершины графа представляют собой поры, а ребра графа – каналы, связывающие эти поры. ПСМ используются для моделирования однофазной и двухфазной проницаемостей – определении коэффициентов фильтрации и влагопроводности (Blunt, 2011; Gerke et al., 2024). Они также применяются в моделировании поведения флюидов в нанопорах (Yang, 2019). Представление порового пространства в виде графа может быть использовано для исследования морфологических свойств образца (Tolstygin et al., 2025). Поросетевое моделирование может быть использовано для изучения морфологических задач и задач динамики флюидов в пористой среде, включая моделирование гистерезиса (Ahrenholz, 2008), исследование сорбции флюидов (Xu, Prodanović, 2018), анализ связности порового пространства (Bernabé et al., 2010), исследование распределения пор по размерам (Vogel, 2000; Gerke, 2024; Tolstygin et al., 2025), получение капиллярных кривых (Vogel, 2000; Gerke, 2024), исследование поведения газов (Mahabadi et al., 2016). Современные методы извлечения ПСМ позволяют сохранять и анализировать топологию порового пространства (Zubov et al., 2022).

Изучение возможностей и областей применения ПСМ, их сравнение с классическими методами физики почв являются задачами переднего края науки с учетом обширного накопленного опыта в области микротомографии порового пространства почвы зарубежных и отечественных исследователей (Герке и др., 2012; Романенко и др., 2017; Иванов и др., 2019; Абросимов и др., 2021).

В этой статье раскрываются основные принципы работы поросетевых моделей и проводится сравнение гидрофизических характеристик почвы, измеренных традиционными методами и полученных методами поросетевого моделирования. Дополнительно в рамках работы будут затронуты методические аспекты работы с ПСМ, включая детали извлечения графов ПСМ из 3D-изображений микротомографии образцов почвы.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Отбор образцов, определение почвенных свойств

Полевой этап исследования был проведен в Центральном черноземном заповеднике имени В.В. Алёхина в Курской области. Почва участка косимой степи была классифицирована как чернозем миграционно-мицеллярный (Полевой определитель почв России, 2008), Greyzemic Chernozem (Loamic, Pachic) (WRB, 2022). Отбор ненарушенных образцов (монолиты) был проведен из трех почвенных горизонтов – AU_{rz}, AU, BC_A с глубин 20, 40 и 80 см соответственно. Образцы были аккуратно отобраны в полипропиленовые трубки диаметром 20 мм и высотой 5 мм. Процедура пробоотбора выглядела следующим образом: 1) вырезка куба $5 \times 5 \times 5 \text{ см}^3$ из подготовленного почвенного горизонта; 2) обрезка полученного куба до цилиндра с диаметром в 2 см, соответствующего диаметру трубки, в которую в дальнейшем помещался образец; 3) перенос цилиндра почвы в трубку; 4) обрезка нижней части цилиндра. Сразу же после пробоотбора каждый цилиндр был закрыт полиэтиленовой пленкой для предотвращения испарения влаги и сохранения полевой влажности. Все образцы были упакованы в холодильную камеру, в которой поддерживалась температура в 4 °C.

В дополнительно отобранных средних нарушенных образцах почвы с тех же глубин были определены базовые характеристики почвы (табл. 1) (Fomin et al., 2021). Гранулометрический состав почвы был определен методом лазерной дифракции на дифрактометре Microtrac BlueWave (USA) при пробоподготовке с использованием ультразвуковой диспергации с энергией $450 \text{ Дж} \cdot \text{мл}^{-1}$ (Юдина, Фомин, 2023; Yudina et al., 2018). Содержа-

ние органического углерода (C_{org}) почвы было определено методом сухого сжигания. Плотность почвы (ρ_b) была определена буровым методом (Вадюнина, Корчагина, 1961). Пористость почвы (ϵ) была рассчитана на основании плотности почвы и плотности твердой фазы (Шейн, 2005). Влажность почвы была определена сушкой при 105 °C на протяжении 8 часов (Вадюнина, Корчагина, 1961).

Таблица 1. Характеристики исследуемых образцов
Table 1. Characteristics of studied samples

Горизонт	Ил (<1 мкм), %	Пыль (1–50 мкм), %	Песок (50–2000 мкм), %	C_{org} , %	ρ_b , г/см ³	ϵ , %
AU _{rz}	7.71	83.82	8.47	5.70±0.15	1.01±0.03	60.41±1.04
AU	7.47	84.45	8.08	4.29±0.21	1.12±0.09	55.94±3.43
BCA	8.11	83.82	8.07	3.55±0.22	1.21±0.05	52.65±1.91

**Дизайн лабораторного эксперимента
по иссушению образца почвы**

Схема эксперимента детально описана в работе Fomin et al. (2023). Кратко: насыщение от полевой влажности до полного насыщения ($pF = 0$) капиллярным поднятием осуществлялось на протяжении двух недель. Дальнейшее иссушение осуществлялось тензиостатическим методом. Равновесие в каждой точке достигалось на протяжении 14–21 дн. Для доведения до абсолютно сухого состояния образцы почв высушивались при 105 °C в течение 48 часов. Соответствующие экспериментальные точки $pF - W$ были использованы для дальнейшей аппроксимации и получения кривых основных гидрофизических характеристик по уравнению ван Генухтена и расчету коэффициента влагопроводности по уравнению ван Генухтена-Муалема.

Томография почв, обработка изображений

Компьютерная томография образцов проведена на томографе SkyScan 1172 (Bruker, Бельгия) с ускоряющим напряжением 70 кВ и силой тока 130 мА. Разрешение полученных изображений размерами $2\,000 \times 2\,000$ мкм по осям X и Y соответственно, составляло 7.92 мкм на воксель. Пример полученного 3D-изображения приведен на рисунке 2.

После томографии была произведена реконструкция изображений. Реконструкция осуществлялась с использованием программного обеспечения nRecon (Bruker) со следующими параметрами: сглаживание (гауссово размытие) = 2, усиление пучка = 30%, гистограмма оттенков серого от -500 до 3 000 единиц Хаусенфилда, где -500 соответствует сигналу ниже сигнала воздуха вокруг образца.

Последующая обработка изображений включала в себя фильтрацию и сегментацию (бинаризацию). Первый этап – фильтрация – необходим для очистки изображения от лишних шумов. Этот шаг был осуществлен при помощи метода нелокальных средних (Buades, Coll, Morel, 2011). Параметры фильтрации: радиус поиска = 10, количество итераций = 4.

Второй этап – сегментация – подразумевает разделение исходного изображения на фазы, в данном случае – на твердую фазу и поровое пространство. Сегментация была выполнена методом наращивания регионов (Hashemi et al., 2014). Границы фаз подбились визуально, посредством итеративного перебора, параметр $r_{\text{в}} \text{ радиус} = 2$. Пример 2D-изображения на каждом из этапов обработки приведен на рисунке 1.

Аппроксимация основной гидрофизической характеристики уравнением ван Генухтена

Для построения кривых основных гидрофизических характеристик, экспериментальные точки были аппроксимированы уравнением ван Генухтена (1):

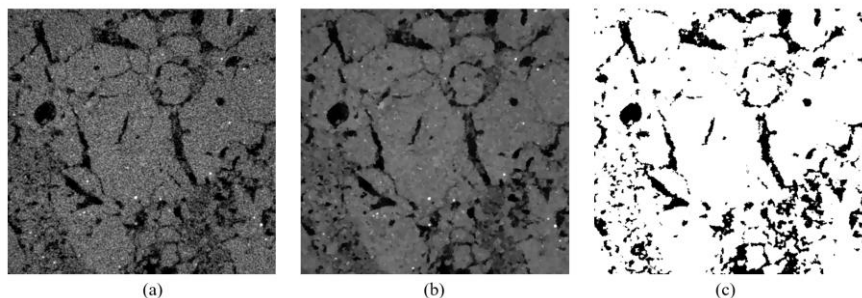


Рис 1. Последовательность шагов в подготовке изображений компьютерных томограмм почв к анализу на примере 2D-изображений каждого этапа обработки. Здесь (а) – исходное изображение, (b) – изображение после фильтрации методом нелокальных средних, (с) – сегментированное на две фазы изображение (черное – поры, белое – твердая фаза).

Fig. 1. Sequence of steps in preparing images of soil computer tomograms for analysis using the example of 2D images of each processing stage. Here (a) is the original image, (b) is the image after filtering by the non-local means method, (c) is the image segmented into two phases (black is pores, white is solid phase).

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left(\frac{1}{1 + (\alpha * P)^n} \right)^{1-1/n}, \quad (1)$$

где S_e – влагонасыщенность почвы, θ – объемная влажность почвы, θ_r – остаточная влажность, θ_s – влажность насыщения, α – величина, обратная давлению входа воздуха, P – давление, n – величина, зависящая от пористости почвы (van Genuchten, 1980).

Аппроксимация кривых была выполнена при помощи использования открытой библиотеки SciPy на языке программирования Python 3.12. Полученные после аппроксимации параметры θ_r , θ_s , α и n были использованы для получения коэффициентов влагопроводности по уравнению ван Генухтена-Муалема (2):

$$K_{вл} = K_{\phi} * S_e^l \left[1 - \left(1 - S_e^m \right)^m \right]^2, \quad (2)$$

где $K_{вл}$ – коэффициент влагопроводности почвы, K_{ϕ} – коэффициент фильтрации почвы и l – параметр, зависящий от связности пор и, как правило, принимаемый равным 0.5 (Mualem, 1976).

Для каждого горизонта значения Se , полученные из уравнения ван Генухтена, были нормализованы на пористость почвы с целью получить значения относительной влагонасыщенности. Значения $K_{вл}$ были нормализованы на значения K_{ϕ} с целью получить относительную ненасыщенную гидравлическую проводимость. В таких координатах приведены графики основных гидрофизических характеристик и относительных проводимостей.

Извлечение поросетевой модели, моделирование двухфазной проницаемости

Извлечение ПСМ из сегментированных томографических изображений почвы осуществлялось при помощи метода, основанного на дискретной теории Морса, позволяющего сохранять геометрию и топологию порового пространства (Zubov et al., 2022). Для извлечения модели из каждого образца использовалось 3D-изображение размером $1\,400^3$ вокселей. В ПСМ пространство почвы представляется в виде графа, где поры – вершины этого графа, а каналы, связывающие эти поры – грани графа. При извлечении модели сложные формы пор упрощаются до элементарных геометрических фигур: прямоугольника, круга или треугольника. Подобное упрощение производится на основании шейп-фактора поры. Формула и объяснение принципа шейп-фактора приведена в работе Karsanina et al. (2015).

Экстракция ПСМ была выполнена с использованием следующих параметров: предел размера упрощения – 0.0, предел устойчивости упрощения – 1.0, коэффициент заполнения каналов – 0.33. Предел размера упрощения ограничивает максимальный объем поры, которая может участвовать в упрощении. При нулевом значении предел упрощения фактически снимается. Предел устойчи-

вости упрощения ограничивает процесс упрощения пределом устойчивости. Чем выше этот предел, тем большее упрощение происходит. Коэффициент заполнения каналов задает часть расстояния между порами, которая будет передана каналам. Для реальных пористых сред используется стандартное значение равное 0.33.

После извлечения модель сохраняется в виде ненаправленного графа в формате “statoil” с сохранением всей геометрической информации. Шейп-факторы для каждой поры также сохраняются. Подробная информация о работе этого формата приведена в работе Gerke et al. (2020). Используя этот формат, ПСМ может быть представлена в виде диаграммы “шаров и цилиндров”, где шары – поры, а цилиндры – каналы между порами. Важно отметить, что данная схема является всего лишь удобным инструментом визуализации: в дальнейшем моделировании проницаемости учитывается форма поры, в то время как на диаграмме все поры выглядят сферически, что не так (рис. 2). Все визуализации ПСМ были созданы с использованием открытой библиотеки [vtk](https://pyvi.org/project/vtk/) (<https://pyvi.org/project/vtk/>).

После извлечения ПСМ они были использованы для моделирования двухфазного течения. Базой такого моделирования является модель Хагена-Пуазейля для гидравлической проводимости между двумя порами (3):

$$q = \frac{g_{el}}{L_{el}} \Delta p, \quad (3)$$

где q – поток между двумя порами, соединенными каналом, g_{el} – проводимость флюида в элементе ПСМ длины L_{el} и Δp – давление между центрами пор.

В качестве закона сохранения используется уравнение неразрывности для несжимаемой жидкости (4):

$$\sum_j q_{ij} = 0, \quad (4)$$

где мы суммируем потоки по j -ым каналам, связывающим i -ые поры.

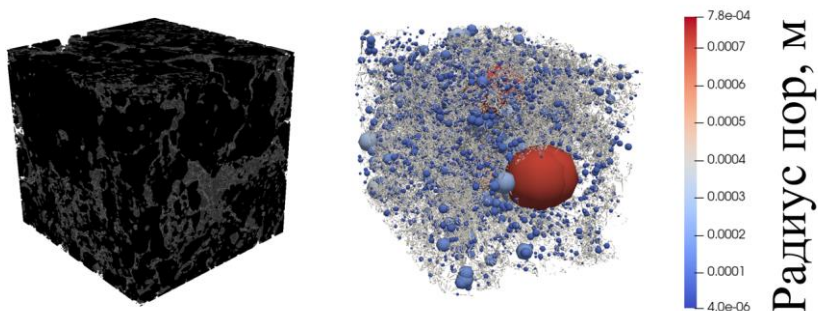


Рис. 2. Пример поросетевой модели, извлекаемой из 3D-изображения почвы. Здесь (а) – 3D изображение почвы, (б) – диаграмма “шаров и цилиндров” поросетевой модели.

Fig. 2. An example of a soil pore-network model extracted from a 3D soil image. Here (a) is a 3D soil image, (b) is a “balls and cylinders” diagram of the soil network model.

Расчет гидравлической проводимости для любого двумерного поперечного сечения (или менисков жидкости для многофазного потока) g основан на безразмерной модели проводимости (Patzek, Silin, 2001) (5):

$$g = \frac{A^2 \tilde{g}}{\mu_f}, \quad (5)$$

где A – площадь поперечного сечения, $\tilde{g}$ – безразмерная гидравлическая проводимость, согласно модели “круг-треугольник-квадрат” (Patzek, Silin, 2001), а μ_f – вязкость жидкости.

После того, как все топологические и геометрические свойства порового пространства установлены, проницаемость ПСМ вычисляется путем решения системы линейных уравнений, полученных из уравнений непрерывности (уравнение 4) и импульса, т. е. потока с использованием уравнения Хагена-Пуазейля (уравнение 3) для каждой поры. Задавая давление на входе и выходе, мы можем сначала установить давление в каждой поре, а затем вы-

числить коэффициент фильтрации внутри каждого элемента “пора-канал-пора” в соответствии с законом Дарси (Valvante, Blunt, 2004).

После определения абсолютной проницаемости (коэффициента фильтрации) мы переходим к моделированию двухфазной проницаемости. Поскольку мы пытаемся симулировать лабораторные эксперименты, в которых из капиллярно-насыщенной почвы тем или иным методом извлекается вода, то в начале симуляции мы считаем все поры заполненными водой. Предполагая, что твердая фаза почвы смачивается водой (угол контакта ниже 90°), мы постепенно наращиваем давление воздуха и проверяем возможность проникновения воздуха в заполненные водой поры и каналы. Таким образом мы, по сути, моделируем классический процесс дренажа. На этом этапе мы проверяем только одно: может ли происходить вытеснение поршневого типа (широко известного в зарубежной литературе как *piston-type displacement*) при увеличении капиллярного давления, где воздух сначала проникает в самую большую связанную основу пор. Возникновение *piston-type displacement* устанавливается энергетическим балансом и для круглых пор задается известным уравнением Юнга-Лапласа; для квадратных и треугольных пор его можно вычислить аналитически с использованием метода, описанного в Ma et al. (1996). Затем давление входа воздуха вычисляется как (Øren et al., 1998):

$$\begin{cases} P_{entry} = \frac{\sigma \cos \gamma_{res} (1 + 2\sqrt{\pi G})}{r} F_d(\gamma_{res}, G), \\ F_d(\theta_{res}, G) = \frac{1 + \sqrt{1 + \frac{4GD}{\cos^2 \theta_r}}}{(1 + 2\sqrt{\pi G})}, \end{cases} \quad (6)$$

где F_d – безразмерный поправочный коэффициент для смачивающей жидкости, которая может удерживаться в углах, σ – поверхностное натяжение между воздухом и водой; γ_{res} – контактный угол, D – сложная функция межфазного интерфейса мениска и локальных углов поперечного сечения (Ma et al., 1996); r – радиус поры или канала, G – шейп-фактор поры. После входа воздуха в поровое пространство локальные положения менисков можно вычислить в соответствии с P_{entry} . Если геометрия менисков в попе-

речном сечении известна, можно определить гидравлическую проводимость для фаз воздуха и воды в данной поре (Patzek, Kristensen, 2001). Таким образом, задавая шаги давления, мы вычисляем положения менисков на каждом из шагов давления. Когда увеличение давления воздуха не приводит к дальнейшему изменению водонасыщенности, процесс дренажа останавливается. Как правило, следующим этапом идет моделирование пропитки образца, однако в данной работе такое моделирование не осуществлялось, и потому его подробное описание не приводится. На рисунке 3 приведено схематичное изображение процесса дренажа в треугольной поре.

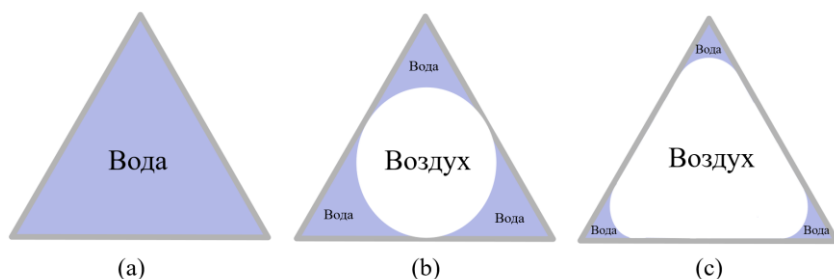


Рис. 3. Схематичный пример моделирования двухфазной проницаемости в поросетевой модели при дренаже в треугольной поре-канале треугольного сечения. Здесь (а) – пора целиком заполнена водой, (б) – воздух входит в пору, вода остается в менисках, (с) – дренаж продолжается, водные мениски утончаются. Направление потока от себя.
Fig. 3. Schematic example of modeling two-phase permeability in a pore-network model with drainage in a triangular pore-throat. Here (a) – the pore is completely filled with water, (b) – air enters the pore, water remains in the meniscus, (c) – drainage continues, water meniscus becomes thinner.

После определения положений менисков на каждом шаге капиллярного давления мы вычисляем водонасыщенность в системе и относительные проводимости воды и воздуха по уравнениям 3 и 4, что позволяет нам получить ненасыщенную гидравли-

ческую и пневматическую проводимости. Основные гидрофизические характеристики в данном методе получаются построением зависимости водонасыщенности на каждом конкретном шаге давления.

Моделирование однофазного и двухфазного течений в масштабе пор было осуществлено посредством открытой библиотеки *pnflow* (Valvante, Blunt, 2004). Характеристики флюида для воды и воздуха были зафиксированы для комнатной температуры (20 °C), и во время моделирования предполагались идеальные условия смачивания водой (краевой угол смачивания равен 0°). Поток моделировался вдоль направления Z.

Помимо исследования гидрофизических свойств почвы, ПСМ также может быть применена для количественного анализа порового пространства. Используя извлеченные ПСМ, были оценены общее количество пор и каналов, а также распространенные (Tolstygina et al., 2025; Gerke et al., 2024) в исследовании пористых сред параметры – эйлерова характеристика и связность. Эйлерова характеристика определялась как разность между количеством пор и каналов, связность – среднее количество каналов на пору. Эти параметры используются для сравнения поведения пористого пространства в разных образцах: уменьшение числа пор и увеличение числа каналов приводят к росту связности и уменьшению эйлеровой характеристики образца, что позволяет делать выводы об изменении физических свойств порового пространства.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Извлечение поросетевой модели

Из каждого исследованного 3D-изображения компьютерной томографии почв была извлечена поросетевая модель. Все поросетевые модели были визуализированы для оценки качества извлечения и соответствия исходной 3D-структуре (рис. 4).

Из извлеченных ПСМ были получены количественные характеристики – число пор, число каналов, эйлерова характеристика и связность (табл. 2). Согласно полученным данным, количество пор снижается от горизонта AU_{rz} к горизонту AU и вновь возрастает к горизонту BSA. Прямо противоположное происходит

с количеством каналов. Как следствие, такое поведение приводит к уменьшению эйлеровой характеристики и росту связности в горизонте AU.

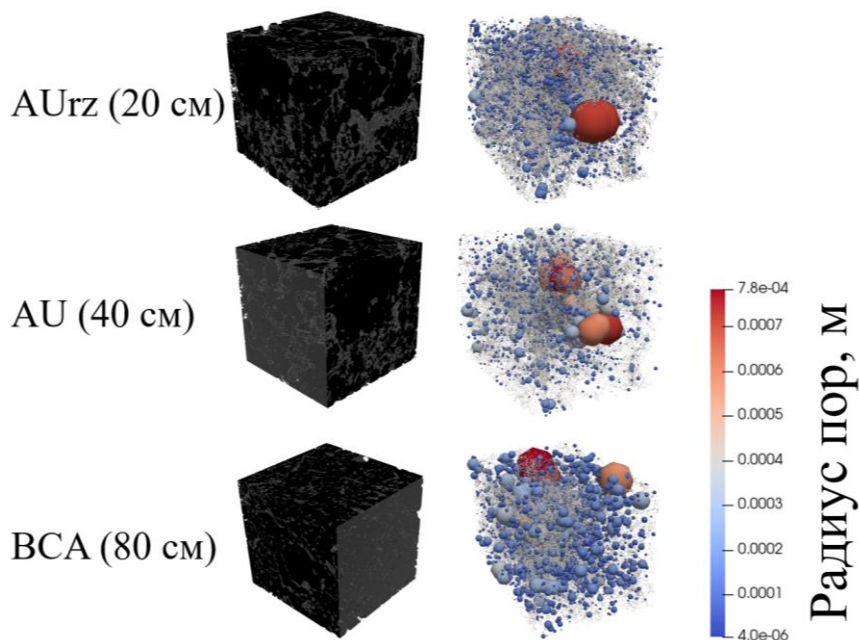


Рис. 4. Результаты извлечения поросетевой модели. Здесь слева – 3D-изображение образца почвы, справа – извлеченная поросетевая модель.

Fig. 4. Results of the extraction of the pore network model. Here on the left is a 3D image of the soil sample, on the right is the extracted pore network model.

Таблица 2. Характеристики извлеченных поросетевых моделей
Table 2. Characteristics of the extracted network models

Горизонт	Число пор	Число каналов	Эйлерова характеристика	Связность
AUrz	180379	66831	113548	0.741
AU	173209	83619	89590	0.966
BCA	180658	58036	122622	0.642

Моделирование двухфазной проницаемости

Посредством моделирования двухфазной проницаемости в ПСМ были получены кривые иссушения (дренажа) для каждого исследованного образца. Модельные кривые сравнивались с кривыми, полученными аппроксимацией уравнением ван Генухтена экспериментальных точек основной гидрофизической характеристики (рис. 5). В каждом из исследованных горизонтов наблюдаются схожие закономерности при сравнении поведения кривых, полученных аппроксимацией уравнением ван Генухтена и моделированием в масштабе пор в ПСМ – расхождение и образование двух зон дивергенции в областях низкой ($0 < S_w < 0.4$) и высокой ($0.8 < S_w < 1$) водонасыщенности. Уравнение ван Генухтена показывает адекватную степень аппроксимации, однако расходится с экспериментальными показаниями в областях высокого давления.

На основе ПСМ исследуемых образцов были получены кривые зависимости ненасыщенной гидравлической проводимости (коэффициентов влагопроводности, нормированных на коэффициент фильтрации – насыщенную гидравлическую проводимость) от относительной влагонасыщенности почвы. Модельные кривые сравнивались с кривыми, полученными расчетом по уравнению ван Генухтена-Муалема с использованием параметров аппроксимации экспериментальных точек основной гидрофизической характеристики уравнением ван Генухтена (рис. 6). Коэффициент l в уравнении ван Генухтена-Муалема принят равным 0.5.

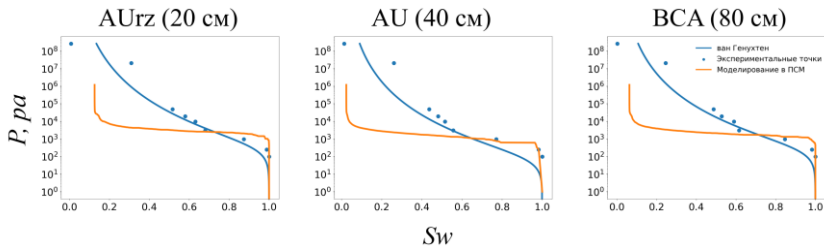


Рис. 5. Основные гидрофизические характеристики, полученные аппроксимацией экспериментальных точек уравнением ван Генухтена и полученные моделированием двухфазной проницаемости в поросетевой модели. Ось абсцисс отложена в S_w – относительной влагонасыщенности почвы. Важно отметить, что ось ординат соответствует отрицательному давлению, но для удобства просмотра отражена как положительная.

Fig. 5. The main hydrophysical characteristics obtained by approximating the experimental points with the van Genuchten equation and obtained by modeling two-phase permeability in a pore-net model. The X-axis is plotted in S_w – the relative moisture saturation of the soil. It is important to note that the Y-axis corresponds to negative pressure, but for ease of viewing is reflected as positive.

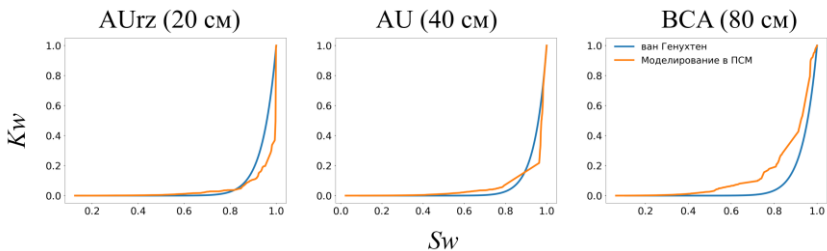


Рис. 6. Относительные ненасыщенные гидравлические проводимости, рассчитанные по уравнению ван Генухтена-Муалема и полученные моделированием двухфазной проницаемости в поросетевой модели. Ось абсцисс отложена в S_w – относительной влагонасыщенности почвы. Ось ординат отложена в K_w – относительной ненасыщенной гидравлической проводимости.

Fig. 6. Relative unsaturated hydraulic conductivities calculated using the van Genuchten-Mualem equation and obtained by modeling two-phase permeability in a pore network model. The X-axis is S_w – the relative soil moisture saturation. The Y-axis is K_w – the relative unsaturated hydraulic conductivity.

Кривые, полученные по уравнению ван Генухтена-Муалема и моделированием в ПСМ хорошо сходятся в горизонте AU. В горизонте AUrz кривая, полученная моделированием в ПСМ, лежит чуть ниже кривой ван Генухтена-Муалема, а в горизонте ВСА – чуть выше. В горизонтах AUrz и ВСА, где кривые не сходятся, аналогичным образом можно добиться большей сходимости результатов, варьируя параметр l , однако это не является темой данного исследования.

Распределение пор по размерам

Для количественной оценки порового пространства были получены кумулятивные кривые распределения пор по размерам, полученные из основных гидрофизических характеристик для аппроксимации по уравнению ван Генухтена и из моделирования в ПСМ (рис. 7). Максимальным достижимым значением пористости считается наибольшая объемная влажность, нормированная на пористость образца. Полученный результат позволяет интерпретировать появление двух зон дивергенции на кривых водоудерживания (рис. 8).

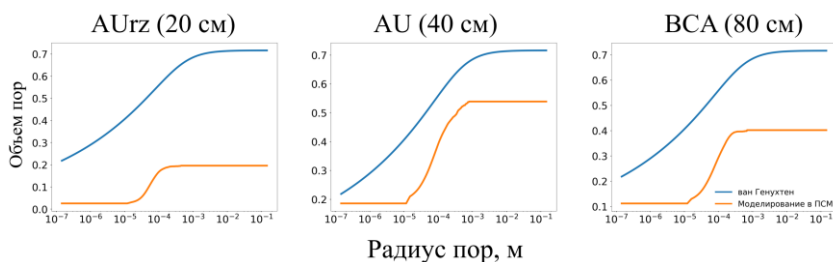


Рис. 7. Кумулятивные кривые распределения пор по размерам, полученные из основных гидрофизических характеристик для аппроксимации по уравнению ван Генухтена и из моделирования в поросетевой модели.

Fig. 7. Cumulative pore size distribution curves obtained from the main hydrophysical characteristics for approximation using the van Genuchten equation and from modeling in the pore network model.

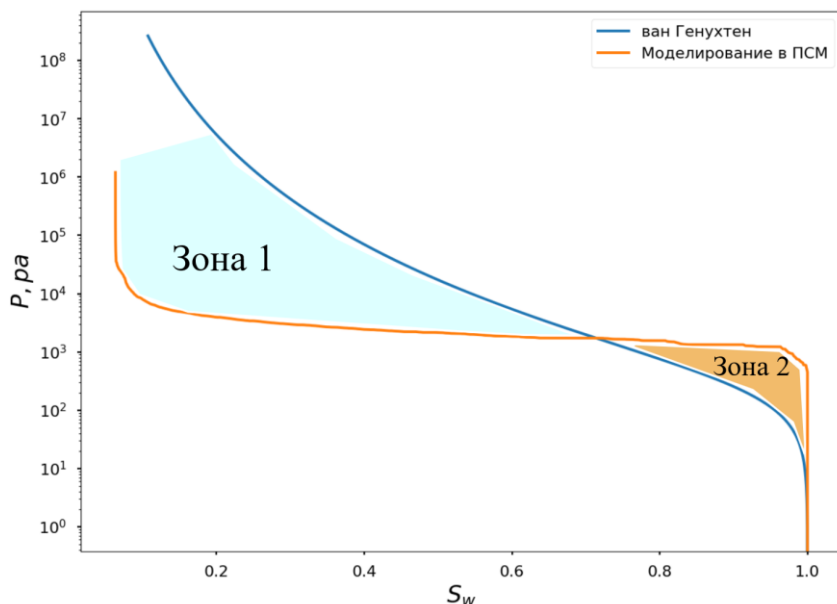


Рис. 8. Две зоны дивергенции в основных гидрофизических характеристиках, полученных аппроксимацией уравнением ван Генухтена и моделированием в поросетевой модели. Важно отметить, что ось ординат соответствует отрицательному давлению, но для удобства просмотра отражена как положительная.

Fig. 8. Two zones of divergence in the main hydrophysical characteristics obtained by approximation with the van Genuchten equation and modeling in the pore-network model. It is important to note that the Y-axis corresponds to negative pressure, but for ease of viewing is reflected as positive.

На графиках видно, что в областях пор среднего размера (10^{-5} – 10^{-3} м) поведение кумулятивных кривых, полученных моделированием в ПСМ, фактически повторяет поведение кривых, полученных из основных гидрофизических характеристик по уравнению ван Генухтена. В областях микропористости (10^{-7} – 10^{-5} м) и макропористости (10^{-3} – 10^{-1} м) видно “платообразное” поведение кривых: то есть общий объем порового пространства не увеличивается за счет вклада этих пор – они фактически отсутствуют в

образце. Причинами такого “отсутствия” являются ограничение разрешения томографии (в области микропор) и наличие граничных эффектов (макропористость), суть которых раскрывается в следующем параграфе.

Сравнение результатов, полученных моделированием в поросетевой модели и методом ван Генухтена

Полученные результаты для образцов из различных горизонтов почвы демонстрируют одинаковую закономерность. Аппроксимация уравнением ван Генухтена практически идеально ложится на экспериментальные точки. Исключение составляют точки высоких значений pF , что, впрочем, неоднократно подтверждалось в других исследованиях (Ghanbarian-Alavijeh et al., 2010). Тем не менее, интересным является наличие двух областей дивергенции между экспериментальными данными и моделированием в ПСМ (рис. 8). Появление зоны 1 обуславливается несовершенством метода компьютерной томографии в силу недостаточности максимальной детализации почвы. На томографических изображениях и в полученных ПСМ нет части микропористости за пределами разрешения съемки (<7.92 мкм), которая присутствует в образце, и которую мы можем оценить через весовую пористость. Этот результат сходится с данными, полученными в исследовании Gerke et al. (2024), где в качестве исходных образцов также были выбраны черноземные почвы, а концепция “недостатка” микропор в ПСМ была подтверждена экспериментально.

Зона 2 отображает гораздо более низкие измеренные капиллярные входные давления и значения давления в целом для насыщений между $1.0 > S_w > 0.8$. Причина отклонения между измеренными и модельными данными связана с граничными условиями лабораторного эксперимента – любой образец почвы будет обладать некоторой неоднородностью там, где он отделен от остальной почвы. Во время насыщения образца некоторые локальные области на поверхности образца будут заполняться водой и дренироваться при гораздо более низких капиллярных давлениях по сравнению с почвой, погруженной в ту же пористую среду вокруг нее. Такие искусственно большие поры могут возникать не только

наверху или внизу образца, но и близко к стенкам цилиндрического образца из-за ориентации частиц (Khirevich et al., 2007). Эта проблема известна в нефтяной инженерии, где часть капиллярной кривой, близкая к $Sw = 1$, обычно рассматривается как ненадежная (Jennings, 1987).

Результаты исследований по сравнению измеренной и смоделированной ненасыщенной гидравлической проводимости показывают противоречивые результаты. В нашей работе сравнение ненасыщенной гидравлической проводимости показывает, что моделирование в ПСМ позволяет получить достаточно близкие результаты к измеренным значениям (рис. 7). Полученные в данной работе результаты подчеркивают хорошую сходимость моделирования в ПСМ с классическими подходами физики почв. Однако в смежной работе авторы наблюдали сильную дивергенцию, обуславливаемую нефизичностью параметра связности пор l в уравнении ван Генухтена-Муалема (Gerke et al., 2024). Сложности в воспроизводимости сходимости результатов прямых измерений и моделирования требуют проведения дальнейших исследований на более широком фактическом материале, включая образцы разного структурного генезиса.

Анализ пригодности применения поросетевых моделей

Результаты работы позволяют сделать утверждение, основанное на ряде критериев, о том, что моделирование гидродинамических свойств почвы с применением ПСМ является крайне перспективным подходом и значительно более надежно, чем классический подход ван Генухтена.

Первый критерий – временные затраты для получения данных. Несмотря на то, что обработка данных и дальнейшие расчеты коэффициента влагопроводности довольно просты, получение экспериментальных измерений основной гидрофизической характеристики почв занимает несколько месяцев (Fomin et al., 2023). Моделирование в ПСМ занимает порядка 4–8 часов на компьютерную томографию образца и порядка 2–4 часов на последующее извлечение ПСМ и дальнейшее моделирование в масштабе пор. Прочие подходы к получению экспериментальных данных ОГХ

(центрифугирование, тензиометрия и т. п.) приводят к разной степени изменения структуры почвы перед или во время анализа, что не отражает реального пространственного поведения потоков (Schlüter et al., 2016).

Второй критерий – широкие возможности математического моделирования. Моделирование в ПСМ позволяет проводить виртуальные эксперименты, например, получение кривых пропитки образцов для изучения гистерезиса основной гидрофизической характеристики и симуляции движения влаги при различных условиях смачивания твердой фазы (Bentz et al., 2022). Подобные исследования крайне трудно провести в лабораторных условиях. Несмотря на то, что в данной работе подобные исследования не проводились, они были подсвечены в других работах (Gerke et al., 2024). Таким образом, ПСМ открывают доступ к более корректной оценке гидрологического режима почв.

Третий критерий – решение проблемы “граничных пор” (рис. 8) с помощью моделирования в ПСМ при измерениях гидродинамических свойств почв. Отметим, что учет “граничных пор” особенно важен для верхних слоев почвы (в том числе пахотных), где наличие таких пор может сильно влиять на правильную оценку верхних граничных условий инфильтрации влаги. ПСМ позволяют учитывать любые типы граничных условий, в том числе с крупными порами на границах или, что особенно важно, при окружении образца почвы остальным почвенным пространством. Таким образом, моделирование в ПСМ в дальнейшем может быть использовано для моделирования гидродинамических свойств на уровне почвенного профиля и ландшафта вместо прямых измерений.

Поросетевое моделирование предлагает новый концептуальный подход в понимании структуры порового пространства. Классический подход ван Генухтена-Муалема основан на капиллярной модели представления пор и предлагает использование коэффициента l в качестве параметра связности пор. В оригинальной работе значение параметра предлагается принимать равным 0.5. Позднее было показано (Дедюлина и др., 2014), что значение этого параметра необходимо варьировать для получения адекватных значений коэффициента влагопроводности, в том числе, в об-

ласть отрицательных значений, что противоречит физике процесса. Парадигма представления порового пространства исключительно в виде капилляров не раз подвергалась критике (Fan, 1956; Dullien, 2012; Hunt et al., 2013). В критических работах подчеркивается несоответствие реальной геометрии и топологии порового пространства, из которого проистекают заведомо некорректные представления о течении гидродинамических процессов. Поросетевое моделирование, в свою очередь, разрешает эти проблемы.

Несмотря на достоинства ПСМ, имеется ряд важных недостатков, подчеркнутых в том числе и в этой работе, которые необходимо упомянуть. Первым из таких является нехватка максимального разрешения компьютерной томографии. Многие исследователи (Karsanina et al., 2018; Wu et al., 2019; Li et al., 2020) сходятся во мнении, что проблема может быть решена методами повышения пространственного разрешения томографических изображений, включая super-resolution (Bai et al., 2023) и multi-scale image pore structure fusion (Karsanina et al., 2018; Wu et al., 2019; Li et al., 2020, Gerke et al., 2017). Другой проблемой является невозможность определить остаточную влажность θ_r . Поскольку лабораторный эксперимент осуществлялся на тензиостате, точные значения θ_r не могли быть достигнуты. Фактически вся оставшаяся в ПСМ на конец дренажа вода удерживается там из-за капиллярных эффектов. В некоторых исследованиях удалось учесть известные значения θ_r в ПСМ (Valvatne, Blunt, 2004).

Важным допущением гидродинамического моделирования с использованием ПСМ является предположение о несжимаемости твердой фазы почвы, что определенно не является идеальным приближением ненасыщенных условий потока в почвах. Другая актуальная проблема, которая требует доработки в текущей реализации ПСМ, – регулирование растворения воздуха в воде и учет ненасыщенной пневматической проводимости.

ВЫВОДЫ

В работе было осуществлено моделирование в поросетевой модели на 3D-изображениях компьютерной томографии образцов разных горизонтов миграционно-мицеллярного чернозема Курской области и сравнение результатов этого моделирования с

классическими подходами физики почв. Результаты сравнения позволяют сделать вывод о перспективности применения ПСМ в почвоведении, поскольку они обладают следующими преимуществами:

- скорость моделирования;
- близкие значения коэффициентов влагопроводности с измеренными в сравнении с расчетами по уравнению ван Генухтена-Муалема;
- решение проблемы граничных эффектов;
- возможность учета гистерезиса;
- возможность учета различных краевых углов смачивания.

Тем не менее, остается ряд вопросов, ответы на которые будут найдены в ходе проведения дальнейших исследований по данной тематике:

- Каким образом на поведение основных гидрофизических характеристик будут влиять начальные условия влажности в образце?
- Как будут отличаться гидродинамические свойства почв при изменении структуры образца? Проведенный в (Fomin et al., 2023) эксперимент позволил установить, что структура порового пространства является крайне динамичной, что должно влиять на свойства поросетевых моделей, основанных на одном и том же образце в его разных состояниях?
- Каким образом применение поросетевых моделей может повлиять на устоявшиеся методологии определения почвенно-гидрологических констант? Может ли поросетевое моделирование стать заменой/усовершенствованием педотрансферных функций?
- Наконец, насколько более точно будут оценены гидродинамические свойства почвы при применении поросетевых моделей и как это повлияет на их практическое применение: оценку поливных норм, запасов влаги и так далее?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абросимов К.Н., Герке К.М., Фомин Д.С., Романенко К.А., Корост

- Д.В. Томография в почвоведении: от первых опытов к современным методам (обзор) // Почвоведение. 2021. Т. 55. №. 9. С. 1097–1112.*
2. *Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А. Методы определения физических свойств почв и грунтов. М.: Высшая школа, 1961. 345 с.*
3. *Герке К.М., Скворцова Е.Б., Корост Д.В. Томографический метод исследования порового пространства почв: состояние проблемы и изучение некоторых почв России // Почвоведение. 2012. №. 7. С. 781–781.*
4. *Дедюлина Е.А., Василевский П.Ю., Поздняков С.П. Чувствительность расчетов инфильтрационного питания к параметру связности пор зоны аэрации // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. 2020. №. 1. С. 81–87.*
5. *Иванов А.Л., Шеин Е.В., Скворцова Е.Б. Томография порового пространства почв: от морфологической характеристики к структурно-функциональным оценкам // Почвоведение. 2019. №. 1. С. 61–69.*
6. *Романенко К.А., Абросимов К.Н., Курчатова А.Н., Рогов В.В. Опыт применения рентгеновской компьютерной томографии в исследовании микростроения мерзлых пород и почв // Криосфера Земли. 2017. Т. 21. №. 4. С. 75–81.*
7. *Шеин Е.В. Курс физики почв. М.: Изд-во МГУ, 2005. 432 с.*
8. *Скворцова Е.Б. Строение порового пространства естественных и антропогенно-измененных почв: Дис. ... докт. с.-х. наук, 03.00.27. М., 1999. 397 с.*
9. *Юдина А.В., Фомин Д.С. Энергия диспергации суглинистых почв до элементарных почвенных частиц с помощью ультразвука // Бюллетень Почвенного института имени ВВ Докучаева. 2023. Вып. 115. С. 87–106. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2023-115-87-106>.*
10. *Ahrenholz B., Tölke J., Lehmann P., Peters A., Kaestner A., Krafczyk M., Durner W. Prediction of capillary hysteresis in a porous material using lattice-Boltzmann methods and comparison to experimental data and a morphological pore network model // Advances in Water Resources. 2008. Vol. 31. No. 9. P. 1151–1173.*
11. *Bai H., Zhou X., Zhao Y., Zhao Y., Han Q. Soil CT image quality enhancement via an improved super-resolution reconstruction method based on GAN // Computers and Electronics in Agriculture. 2023. Vol. 213. Art. No. 108177.*
12. *Ball B.C. Soil structure and greenhouse gas emissions: a synthesis of 20 years of experimentation // European Journal of Soil Science. 2013. Vol. 64. No. 3. P. 357–373.*
13. *Barbosa L.A.P., Gerke K.M., Gerke H.H. Modelling of soil mechanical stability and hydraulic permeability of the interface between coated biopore*

- and matrix pore regions // *Geoderma*. 2022. Vol. 410. Art. No. 115673.
14. *Bentz J., Patel R.A., Benard P., Lieu A., Haupenthal A., Kroener E.* How heterogeneous pore scale distributions of wettability affect infiltration into porous media // *Water*. 2022. Vol. 14(7). Art. No. 1110.
15. *Bernabé Y., Li M., Maineult A.* Permeability and pore connectivity: a new model based on network simulations // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2010. Vol. 115. No. B10.
16. *Blunt M.J.* Flow in porous media—pore-network models and multiphase flow // *Current opinion in colloid & interface science*. 2001. Vol. 6. No. 3. P. 197–207.
17. *Bronick C.J., Lal R.* Soil structure and management: a review // *Geoderma*. 2005. Vol. 124. No. 1–2. P. 3–22.
18. *Buades A., Coll B., Morel J.M.* Non-local means denoising // *Image Processing On Line*. 2011. Vol. 1. P. 208–212.
19. *Dullien F.A.L.* Porous media: fluid transport and pore structure. Academic press, 2012. 598 p.
20. *Fagbemi S., Tahmasebi P.* Coupling pore network and finite element methods for rapid modelling of deformation // *Journal of Fluid Mechanics*. 2020. Vol. 897. No. A20.
21. *Fan I.* The Network Model of Porous Media I. Capillary Pressure Characteristics. *Petroleum Transactions // AIME*. 1956. Vol. 207. P. 144–159.
22. *Fomin D.S., Yudina A.V., Romanenko K.A., Abrosimov K.N., Karsanina M.V., Gerke K.M.* Soil pore structure dynamics under steady-state wetting-drying cycle // *Geoderma*. 2023. Vol. 432. Art. No. 116401.
23. *Fomin D., Timofeeva M., Ovchinnikova O., Valdes-Korovkin I., Holub A., Yudina A.* Energy-based indicators of soil structure by automatic dry sieving // *Soil and Tillage Research*. 2021. Vol. 214. Art. No. 105183.
24. *Gerke K.M., Karsanina M.V., Sizonenko T.O., Miao X., Gafurova D.R., Korost D.V.* Multi-scale image fusion of X-ray microtomography and SEM data to model flow and transport properties for complex rocks on pore-level // *SPE Russian Petroleum Technology Conference. SPE*. 2017. D023S014R002.
25. *Gerke K.M., Khirevich S., Vasilyev R.V., Karsanina M.V., Umarova A.B., Barbosa L.A.P., Korost D.V., Tolstygin K.D., Mallants D., Gerke H.H.* Soil hydraulic properties derived from pore-scale simulations: digital assessment of Ksat through model intercomparison and verification with experimental data // *Soil and Tillage Research*. 2025.
26. *Gerke K.M., Sizonenko T.O., Karsanina M.V., Lavrukhin E.V., Abashkin V.V., Korost D.V.* Improving watershed-based pore-network extraction method using maximum inscribed ball pore-body positioning // *Advances in Water Resources*. 2020. Vol. 140. Art. No. 103576.

27. *Ghanbarian-Alavijeh B., Liaghat A., Huang G.H., Van Genuchten M.T.* Estimation of the van Genuchten soil water retention properties from soil textural data // *Pedosphere*. 2010. Vol. 20. No. 4. P. 456–465.
28. *Gharedaghlou B., Price J.S., Rezanezhad F., Quinton W.L.* Evaluating the hydraulic and transport properties of peat soil using pore network modeling and X-ray micro computed tomography // *Journal of Hydrology*. 2018. Vol. 561. P. 494–508.
29. *Gui-Yuan L.I., Hao-Ming F.A.N.* Effect of freeze-thaw on water stability of aggregates in a black soil of Northeast China // *Pedosphere*. 2014. Vol. 24. No. 2. P. 285–290.
30. *Hashemi M.A., Khaddour G., François B., Massart T.J., Salager S.* A tomographic imagery segmentation methodology for three-phase geomaterials based on simultaneous region growing // *Acta Geotechnica*. 2014. Vol. 9. P. 831–846.
31. *Hunt A.G., Ewing R.P., Horton R.* What's wrong with soil physics? // *Soil Science Society of America Journal*. 2013. Vol. 77(6). P. 1877–1887.
32. *Jennings J.B.* Capillary pressure techniques: application to exploration and development geology // *AAPG Bulletin*. 1987. Vol. 71. No. 10. P. 1196–1209.
33. *Karsanina M.V., Gerke K.M., Skvortsova E.B., Ivanov A.L., Mallants D.* Enhancing image resolution of soils by stochastic multiscale image fusion // *Geoderma*. 2018. Vol. 314. P. 138–145.
34. *Karsanina M.V., Gerke K.M., Skvortsova E.B., Mallants D.* Universal spatial correlation functions for describing and reconstructing soil microstructure // *PloS one*. 2015. Vol. 10. No. 5. e0126515.
35. *Kay B.D.* Soil structure and organic carbon: a review // *Soil processes and the carbon cycle*. 2018. P. 169–197.
36. *Köhne J.M., Schlüter S., Vogel H.J.* Predicting solute transport in structured soil using pore network models // *Vadose Zone Journal*. 2011. Vol. 10. No. 3. P. 1082–1096.
37. *Khirevich S., Hölzel A., Hlushkou D., Tallarek U.* Impact of conduit geometry and bed porosity on flow and dispersion in noncylindrical sphere packings // *Analytical chemistry*. 2007. Vol. 79. No. 24. P. 9340–9349.
38. *Lenormand R., Zarcone C., Sarr A.* Mechanisms of the displacement of one fluid by another in a network of capillary ducts // *Journal of Fluid Mechanics*. 1983. Vol. 135. P. 337–353.
39. *Li X., Teng Q., Zhang Y., Xiong S., Feng J.* Three-dimensional multiscale fusion for porous media on microtomography images of different resolutions // *Physical Review E*. 2020. Vol. 101(5). Art. No. 053308.
40. *Ma S., Mason G., Morrow N.R.* Effect of contact angle on drainage and imbibition in regular polygonal tubes // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 1996. Vol. 117(3). P. 273–291.

41. *Mahabadi N., Dai S., Seol Y., Sup Yun T., Jang J.* The water retention curve and relative permeability for gas production from hydrate-bearing sediments: pore- network model simulation // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2016. Vol. 17. No. 8. P. 3099–3110.
42. *Miranda-Velez J.F., Leuther F., Koehne J.M., Munkholm L.J. Vogeler I.* Effects of freeze-thaw cycles on soil structure under different tillage and plant cover management practices // *Soil and Tillage Research*. 2023. Vol. 225. Art. No. 105540.
43. *Mualem Y.* A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media // *Water resources research*. 1976. Vol. 12. No. 3. P. 513–522.
44. *Øren P.E., Bakke S., Arntzen O.J.* Extending predictive capabilities to network models // *SPE journal*. 1998. Vol. 3(04). P. 324–336.
45. *Patzek T.W., Silin D.B.* Shape factor and hydraulic conductance in noncircular capillaries: I. One-phase creeping flow // *Journal of colloid and interface science*. 2001. Vol. 236. No. 2. P. 295–304.
46. *Patzek T.W., Kristensen J.G.* Shape factor correlations of hydraulic conductance in noncircular capillaries: II. Two-phase creeping flow // *Journal of colloid and interface science*. 2001. Vol. 236. No. 2. P. 305–317.
47. *Rabot E., Wiesmeier M., Schlüter S., Vogel H.J.* Soil structure as an indicator of soil functions: A review // *Geoderma*. 2018. Vol. 314. P. 122–137.
48. *Radcliffe D.E., Simunek J.* Soil physics with HYDRUS: Modeling and applications. CRC press, 2018, 388 p.
49. *Ranaivomanana H., Das G., Razakamanantsoa A.* Modeling of hysteretic behavior of soil–water retention curves using an original pore network model // *Transport in Porous Media*. 2022. Vol. 142. No. 3. P. 559–584.
50. *Schlüter S., Leuther F., Vogler S., Vogel H.J.* X-ray microtomography analysis of soil structure deformation caused by centrifugation // *Solid Earth*. 2016. Vol. 7(1). P. 129–140.
51. *Tolstygin K.D., Kulygin D.A., Khlyupin A., Romanenko K.A., Gerke K.M.* Soil structural transformation under multiple freeze-thaw cycles: comprehensive morphological and topological description // *Soil and Tillage research*. 2025.
52. *Valvatne P.H., Blunt M.J.* Predictive pore- scale modeling of two- phase flow in mixed wet media // *Water resources research*. 2004. Vol. 40(7). W07406.
53. *Van Genuchten M.T.* A closed- form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils // *Soil science society of America journal*. 1980. Vol. 44. No. 5. P. 892–898.
54. *Vogel H.J.* A numerical experiment on pore size, pore connectivity, water retention, permeability, and solute transport using network models // *European*

Journal of Soil Science. 2000. Vol. 51. No. 1. P. 99–105.

55. Vogel H.J., Roth K. Quantitative morphology and network representation of soil pore structure // *Advances in water resources*. 2001. Vol. 24. No. 3–4. P. 233–242.

56. Vogel H.J., Balseiro-Romero M., Kravchenko A., Otten W., Pot V., Schlüter S., Baveye P.C. A holistic perspective on soil architecture is needed as a key to soil functions // *European Journal of Soil Science*. 2022. Vol. 73. No. 1. e13152.

57. Wu Y., Tahmasebi P., Lin C., Ren L., Dong C. Multiscale modeling of shale samples based on low-and high-resolution images // *Marine and Petroleum Geology*. 2019. Vol. 109. P. 9–21.

58. Xu R., Prodanović M. Effect of pore geometry on nitrogen sorption isotherms interpretation: A pore network modeling study // *Fuel*. 2018. Vol. 225. P. 243–255.

59. Yang Y., Wang K., Zhang L., Sun H., Zhang K., Ma J. Pore-scale simulation of shale oil flow based on pore network model // *Fuel*. 2019. Vol. 251. P. 683–692.

60. Yudina A.V. et al. From the notion of elementary soil particle to the particle-size and microaggregate-size distribution analyses: A review // *Eurasian soil science*. 2018. Vol. 51. P. 1326–1347.

61. Zubov A.S., Murygin D.A., Gerke K.M. Pore-network extraction using discrete Morse theory: Preserving the topology of the pore space // *Physical Review E*. 2022. Vol. 106. No. 5. Art. No. 055304.

REFERENCES

1. Abrosimov K.N., Gerke K.M., Fomin D.S., Romanenko K.A., Korost D.V., Tomografiya v pochvovedenii: ot pervykh opytov k sovremennym metodam (obzor) (Tomography in Soil Science: from the first experiments to modern methods (review)), *Pochvovedenie*, 2021, Vol. 55, No. 9, pp. 1097–1112.
2. Vadyunina A.F., Korchagina Z.A., Metody opredeleniya fiziche-skikh svoystv pochv i gruntov (Methods for determining the physical properties of soils and grounds), Moscow: Vyshaya shkola, 1961, 345 p.
3. Gerke K.M., Skvortsova E.B., Korost D.V., Tomograficheskii metod issledovaniya porovogo prostranstva pochv: sostoyanie problema i izuchenie nekotorykh pochv Rossii (Tomographic method for studying the pore space of soils: the state of the problem and the study of some soils of Russia), *Pochvovedenie*, 2012, No. 7, pp 781–781.
4. Dedyulina E.A., Vasilevskii P.Yu., Pozdnyakov S.P., Chuvstvi-tel'nost' raschetov infil'tratsionnogo pitaniya k parametru svyaznosti por zony aeratsii

(Sensitivity of infiltration recharge calculations to the pore connectivity parameter of the aeration zone), *Vestnik Moskovskogo universite-ta. Seriya 4. Geologiya*, 2020, No. 1, pp. 81–87.

5. Ivanov A.L., Shein E.V., Skvortsova E.B., Tomografiya porovogo prostranstva pochv: ot morfologicheskoi kharakteristiki k strukturno-funktsional'nym otsenkam (Tomography of soil pore space: from morphological characteristics to structural and functional assessments), *Pochvovedenie*, 2019, No. 1, pp. 61–69.

6. Romanenko K.A., Abrosimov K.N., Kurchatova A.N., Rogov V.V., Opyt primeneniya rentgenovskoi komp'yuternoi tomografii v issledovanii mikrostroeniya merzlykh porod i pochv (Experience in using X-ray computed tomography in studying the microstructure of frozen rocks and soils), *Kriosfera Zemli*, 2017, Vol. 21, No. 4, pp. 75–81.

7. Shein E.V., *Kurs fiziki pochv* (Soil Physics Course), Moscow: Izd-vo MGU, 2005, 432 p.

8. Skvortsova E.B., *Stroenie porovogo prostranstva estestvennykh i antropogennnoizmenennykh pochv: Diss. ... dokt. s.-kh. nauk* (Structure of pore space of natural and anthropogenically modified soils, Dr. agric. sci. thesis), Moscow, 03.00.27, 1999, 397 p.

9. Yudina A.V., Fomin D.S., Energy of dispersing of loamy soils to elementary particles using ultrasound, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2023, Vol. 115, pp. 87–106, DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2023-115-87-106>.

10. Ahrenholz B., Tölke J., Lehmann P., Peters A., Kaestner A., Krafczyk M., Durner W., Prediction of capillary hysteresis in a porous material using lattice-Boltzmann methods and comparison to experimental data and a morphological pore network model, *Advances in Water Resources*, 2008, Vol. 31, No. 9, pp. 1151–1173.

11. Bai H., Zhou X., Zhao Y., Zhao Y., Han Q., Soil CT image quality enhancement via an improved super-resolution reconstruction method based on GAN, *Computers and Electronics in Agriculture*, 2023, Vol. 213, Art. No. 108177.

12. Ball B.C., Soil structure and greenhouse gas emissions: a synthesis of 20 years of experimentation, *European Journal of Soil Science*, 2013, Vol. 64, No. 3, pp. 357–373.

13. Barbosa L.A.P., Gerke K.M. Gerke H.H., Modelling of soil mechanical stability and hydraulic permeability of the interface between coated biopore and matrix pore regions, *Geoderma*, 2022, Vol. 410, Art. No. 115673.

14. Bentz J., Patel R.A., Benard P., Lieu A., Hauptenthal A., Kroener E., How heterogeneous pore scale distributions of wettability affect infiltration into porous media, *Water*, 2022, Vol. 14(7), Art. No. 1110.

15. Bernabé Y., Li M., Maineuult A., Permeability and pore connectivity: a new

model based on network simulations, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2010, Vol. 115, No. B10.

16. Blunt M.J., Flow in porous media–pore-network models and multiphase flow, *Current opinion in colloid & interface science*, 2001, Vol. 6, No. 3, pp. 197–207.

17. Bronick C.J., Lal R., Soil structure and management: a review, *Geoderma*, 2005, Vol. 124, No. 1–2, pp. 3–22.

18. Buades A., Coll B., Morel J.M., Non-local means denoising, *Image Processing On Line*, 2011, Vol. 1, pp. 208–212.

19. Dullien F.A.L., Porous media: fluid transport and pore structure, *Academic press*, 2012, 598 p.

20. Fagbemi S., Tahmasebi P., Coupling pore network and finite element methods for rapid modelling of deformation, *Journal of Fluid Mechanics*, 2020, Vol. 897, No. A20.

21. Fan I., The Network Model of Porous Media I. Capillary Pressure Characteristics, *Petroleum Transactions, AIME*, 1956, Vol. 207, pp. 144–159.

22. Fomin D.S., Yudina A.V., Romanenko K.A., Abrosimov K.N., Karsanina M.V., Gerke K.M., Soil pore structure dynamics under steady-state wetting-drying cycle, *Geoderma*, 2023, Vol. 432, Art. No. 116401.

23. Fomin D., Timofeeva M., Ovchinnikova O., Valdes-Korovkin I., Holub A., Yudina A., Energy-based indicators of soil structure by automatic dry sieving, *Soil and Tillage Research*, 2021, Vol. 214, Art. No. 105183.

24. Gerke K.M., Karsanina M.V., Sizonenko T.O., Miao X., Gafurova D.R., Korost D.V., Multi-scale image fusion of X-ray microtomography and SEM data to model flow and transport properties for complex rocks on pore-level, *SPE Russian Petroleum Technology Conference*, SPE, 2017, D023S014R002.

25. Gerke K.M., Gerke K.M., Khirevich S., Vasilyev R.V., Karsanina M.V., Umarova A.B., Barbosa L.A.P., Korost D.V., Tolstygin K.D., Mallants D., Gerke H.H., Soil hydraulic properties derived from pore-scale simulations: digital assessment of Ksat through model intercomparison and verification with experimental data, *Soil and Tillage Research*, 2025.

26. Gerke K.M., Sizonenko T.O., Karsanina M.V., Lavrukhin E.V., Abashkin V.V., Korost D.V., Improving watershed-based pore-network extraction method using maximum inscribed ball pore-body positioning, *Advances in Water Resources*, 2020, Vol. 140, Art. No. 103576.

27. Ghanbarian-Alavijeh B., Liaghat A., Huang G.H., Van Genuchten M.T., Estimation of the van Genuchten soil water retention properties from soil textural data, *Pedosphere*, 2010, Vol. 20, No. 4, pp. 456–465.

28. Gharedaghlou B., Price J.S., Rezanezhad F., Quinton W.L., Evaluating the hydraulic and transport properties of peat soil using pore network modeling and X-ray micro computed tomography, *Journal of Hydrology*, 2018, Vol.

561, pp. 494–508.

29. Gui-Yuan L.I., Hao-Ming F.A.N., Effect of freeze-thaw on water stability of aggregates in a black soil of Northeast China, *Pedosphere*, 2014, Vol. 24, No. 2, pp. 285–290.

30. Hashemi M.A., Khaddour G., François B., Massart T.J., Salager S., A tomographic imagery segmentation methodology for three-phase geomaterials based on simultaneous region growing, *Acta Geotechnica*, 2014, Vol. 9, pp. 831–846.

31. Hunt A.G., Ewing R.P., Horton R., What's wrong with soil physics? *Soil Science Society of America Journal*, 2013, Vol. 77(6), pp. 1877–1887.

32. Jennings J.B., Capillary pressure techniques: application to exploration and development geology, *AAPG Bulletin*, 1987, Vol. 71, No. 10, pp. 1196–1209.

33. Karsanina M.V., Gerke K.M., Skvortsova E.B., Ivanov A.L., Mallants D., Enhancing image resolution of soils by stochastic multiscale image fusion, *Geoderma*, 2018, Vol. 314, pp. 138–145.

34. Karsanina M.V., Gerke K.M., Skvortsova E.B., Mallants D., Universal spatial correlation functions for describing and reconstructing soil microstructure, *PloS one*, 2015, Vol. 10, No. 5, e0126515.

35. Kay B.D., Soil structure and organic carbon: a review, *Soil processes and the carbon cycle*, 2018, pp. 169–197.

36. Köhne J.M., Schlüter S., Vogel H.J., Predicting solute transport in structured soil using pore network models, *Vadose Zone Journal*, 2011, Vol. 10, No. 3, pp. 1082–1096.

37. Khirevich S., Hölzel A., Hlushkou D., Tallarek U., Impact of conduit geometry and bed porosity on flow and dispersion in noncylindrical sphere packings, *Analytical chemistry*, 2007, Vol. 79, No. 24, pp. 9340–9349.

38. Lenormand R., Zarcone C., Sarr A., Mechanisms of the displacement of one fluid by another in a network of capillary ducts, *Journal of Fluid Mechanics*, 1983, Vol. 135, pp. 337–353.

39. Li X., Teng Q., Zhang Y., Xiong S., Feng J., Three-dimensional multiscale fusion for porous media on microtomography images of different resolutions, *Physical Review E*, 2020, Vol. 101(5), Art. No. 053308.

40. Ma S., Mason G. Morrow N.R., Effect of contact angle on drainage and imbibition in regular polygonal tubes, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 1996, Vol. 117(3), pp. 273–291.

41. Mahabadi N., Dai S., Seol Y., Sup Yun T., Jang J., The water retention curve and relative permeability for gas production from hydrate-bearing sediments: pore-network model simulation, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2016, Vol. 17, No. 8, pp. 3099–3110.

42. Miranda-Velez J.F., Leuther F., Koehne J.M., Munkholm L.J., Vogeler I., Effects of freeze-thaw cycles on soil structure under different tillage and plant

cover management practices, *Soil and Tillage Research*, 2023, Vol. 225, Art. No. 105540.

43. Mualem Y., A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, *Water resources research*, 1976, Vol. 12, No. 3, pp. 513–522.

44. Øren P.E., Bakke S., Arntzen O.J., Extending predictive capabilities to network models, *SPE journal*, 1998, Vol. 3(04), pp. 324–336.

45. Patzek T.W., Silin D.B., Shape factor and hydraulic conductance in noncircular capillaries: I. One-phase creeping flow, *Journal of colloid and interface science*, 2001, Vol. 236, No. 2, pp. 295–304.

46. Patzek T.W., Kristensen J.G., Shape factor correlations of hydraulic conductance in noncircular capillaries: II. Two-phase creeping flow, *Journal of colloid and interface science*, 2001, Vol. 236, No. 2, pp. 305–317.

47. Rabot E., Wiesmeier M., Schlüter S., Vogel H.J., Soil structure as an indicator of soil functions: A review, *Geoderma*, 2018, Vol. 314, pp. 122–137.

48. Radcliffe D.E., Simunek J., Soil physics with HYDRUS: Modeling and applications, *CRC press*, 2018., 348 p.

49. Ranaivomanana H., Das G., Razakamanantsoa A., Modeling of hysteretic behavior of soil–water retention curves using an original pore network model, *Transport in Porous Media*, 2022, Vol. 142, No. 3, pp. 559–584.

50. Schlüter S., Leuther F., Vogler S., Vogel H.J., X-ray microtomography analysis of soil structure deformation caused by centrifugation, *Solid Earth*, 2016, Vol. 7(1), pp. 129–140.

51. Tolstygin K.D., Kulygin D.A., Khlyupin A., Romanenko K.A., Gerke K.M., Soil structural transformation under multiple freeze-thaw cycles: comprehensive morphological and topological description, *Soil and Tillage research*, 2025.

52. Valvatne P.H., Blunt M.J., Predictive pore- scale modeling of two- phase flow in mixed wet media, *Water resources research*, 2004, Vol. 40(7), W07406.

53. Van Genuchten M.T., A closed- form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil science society of America journal*, 1980, Vol. 44, No. 5, pp. 892–898.

54. Vogel H.J., A numerical experiment on pore size, pore connectivity, water retention, permeability, and solute transport using network models, *European Journal of Soil Science*, 2000, Vol. 51, No. 1, pp. 99–105.

55. Vogel H.J., Roth K., Quantitative morphology and network representation of soil pore structure, *Advances in water resources*, 2001, Vol. 24, No. 3–4, pp. 233–242.

56. Vogel H.J., Balseiro- Romero M., Kravchenko A., Otten W., Pot V., Schlüter S., Baveye P.C., A holistic perspective on soil architecture is needed

as a key to soil functions, *European Journal of Soil Science*, 2022, Vol. 73, No. 1, e13152.

57. Wu Y., Tahmasebi P., Lin C., Ren L., Dong C., Multiscale modeling of shale samples based on low-and high-resolution images, *Marine and Petroleum Geology*, 2019, Vol. 109, pp. 9–21.

58. Xu R., Prodanović M., Effect of pore geometry on nitrogen sorption isotherms interpretation: A pore network modeling study, *Fuel*, 2018, Vol. 225, pp. 243–255.

59. Yang Y., Wang K., Zhang L., Sun H., Zhang K., Ma J., Pore-scale simulation of shale oil flow based on pore network model, *Fuel*, 2019, Vol. 251, pp. 683–692.

60. Yudina A.V. et al., From the notion of elementary soil particle to the particle-size and microaggregate-size distribution analyses: A review, *Eurasian soil science*, 2018, Vol. 51, pp. 1326–1347.

61. Zubov A.S., Murygin D.A., Gerke K.M., Pore-network extraction using discrete Morse theory: Preserving the topology of the pore space, *Physical Review E*, 2022, Vol. 106, No. 5, 055304.

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2025-123-65-99



Ссылки для цитирования:

Савин И.Ю., Прудникова Е.Ю., Виндекер Г.В., Соболев Н.С. Стратегия спутникового мониторинга содержания органического углерода в пахотных горизонтах почв России // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2025. Вып. 123. С. 65-99. DOI: 10.19047/0136-1694-2025-123-65-99

Cite this article as:

Savin I.Yu., Prudnikova E.Yu., Windecker G.V., Sobolev N.S., Strategy of satellite monitoring of organic carbon content in arable horizons of soils in Russia, Dokuchaev Soil Bulletin, 2025, V. 123, pp. 65-99, DOI: 10.19047/0136-1694-2025-123-65-99

Благодарность:

Работа выполнена в рамках реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения “Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, обеспечение создания системы учета данных о потоках климатически активных веществ и бюджете углерода в лесах и других наземных экологических системах” (рег. № 123030300031-6).

Acknowledgments:

The work was carried out within the framework of the implementation of the innovative project of state importance “Development of a system of ground-based and remote sensing monitoring of carbon pools and greenhouse gas fluxes on the territory of the Russian Federation, ensuring the creation of a system of accounting data on the fluxes of climatically active substances and carbon budget in forests and other terrestrial ecological systems” (registration No. 123030300031-6).

Стратегия спутникового мониторинга содержания органического углерода в пахотных горизонтах почв России

© 2024 г. И. Ю. Савин^{1,2*}, Е. Ю. Прудникова^{1**},
Г. В. Виндекер^{1***}, Н. С. Соболев^{1,3****}

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/0000-0001-7743-8607>,
***<https://orcid.org/0000-0002-0463-4241>,
****<https://orcid.org/0000-0001-5231-902X>.

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

³МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия,
119991, Москва, Ленинские горы, 1.

*Поступила в редакцию 11.09.2024, после доработки 01.10.2025,
принята к публикации 03.06.2025*

Резюме: В мире накоплен достаточно большой опыт дистанционной оценки содержания органического углерода в почвах. Но, если не считать достаточно схематичных глобальных подходов, мониторинг на детальном уровне до сих пор имеет локальный характер, и построенные модели не могут быть экстраполированы на другие территории. Целью исследования было разработать стратегию унифицированного дистанционного мониторинга содержания органического углерода в пахотных горизонтах почв для всей территории России и провести ее апробацию. Стратегия опирается на анализ архивов спутниковых данных Landsat 8-9 OLI. Регрессионные модели (линейные или экспоненциальные) связи отражения открытой поверхности почв в ближнем инфракрасном диапазоне с содержанием органического углерода в пахотном горизонте почв, строятся на основе литературных данных и их параметры подбираются индивидуально для каждого выдела районирования страны, в качестве которого выступает геометрическая часть Единого государственного реестра почвенных ресурсов России. На основе моделей строится базовая карта содержания углерода в пахотных горизонтах почв за период пять лет. После этого на основе тех же методических подходов строится карта содержания углерода на конец текущего года. Сравнение карт позволяет оценить изменения в текущем году относительно базового периода. Демонстрация использования данного подхода проведена для двух контрастных выделов районирования в Тверской и Тульской областях России. Подход показал невысокую, но сопоставимую с аналогами точность для детектирования небольших изменений в содержании углерода (ошибка предсказания составила 0.8–1.0%) и позволил уверенно выявить участки с резкими изменениями. Предполагается, что точность моделирования будет ежегодно возрастать с накоплением полевых данных о содержании углерода в пахотном горизонте почв, а также с уточнением моделей в каждом выделе районирования. Подобный подход может быть

использован для организации ежегодного дистанционного мониторинга изменения содержания углерода в пахотных почвах в рамках климатических проектов страны.

Ключевые слова: содержание углерода в почвах; Landsat; мониторинг почв; пахотные почвы; Россия.

Strategy of satellite monitoring of organic carbon content in arable soil horizons in Russia

© 2024 I. Yu. Savin^{1,2*}, E. Yu. Prudnikova^{1**},
G. V. Windecker^{1***}, N. S. Sobolev^{1,3****}

¹Federal Research Centre “V.V. Dokuchaev Soil Science Institute”,
7 Bld. 2 Pyzhevskiy per., Moscow 119017, Russian Federation,
*<https://orcid.org/0000-0002-8739-5441>, e-mail: savin_iyu@esoil.ru,
**<https://orcid.org/0000-0001-7743-8607>,
***<https://orcid.org/0000-0002-0463-4241>,
****<https://orcid.org/0000-0001-5231-902X>.

²Environmental engineering Institute of RUDN University,
5 Bld. 8 Podolskoe shosse, Moscow 115093, Russian Federation.

³Lomonosov Moscow State University,
1 Leninskie Gori, Moscow 119234, Russian Federation.

Received 11.09.2024, Revised 01.10.2024, Accepted 03.06.2025

Abstract: The world has accumulated quite a lot of experience in remote assessment of organic carbon content in soils. But, except for rather schematic global approaches, monitoring at the detailed level is still localized, and the constructed models cannot be extrapolated to other territories. The aim of the study was to develop a strategy for unified remote sensing monitoring of organic carbon content in arable soil horizons for the whole territory of Russia and to test it. The strategy is based on the analysis of Landsat 8-9 OLI satellite data archives. Regression models (linear or exponential) of the relationship between the reflectance of the open surface of soils in the near infrared range and the content of organic carbon in arable soil horizons are built on the basis of literature data and their parameters are selected individually for each unit of the country regionalization, which is the geometric part of the Unified State Register of Soil Resources of Russia. On the basis of models, a base map of carbon content in arable soil horizons for a period of five years was constructed. After that, a map of carbon content at the end of the current year was built on the basis of the same methodological approaches. Comparison of

the maps allows estimation of changes in the current year relative to the base period. Demonstration of the use of this approach was carried out for two contrasting regionalization units in the Tver and Tula regions of Russia. The approach showed low, but comparable to analogs, accuracy for detecting small changes in carbon content (prediction error was 0.8–1.0%), but allowed to confidently identify areas with abrupt changes. It is assumed that the accuracy of modeling will increase annually with the accumulation of field data on carbon content in the arable horizon of soils, as well as with the refinement of models in each regionalization unit. Such an approach can be used to organize annual remote sensing monitoring of carbon content changes in arable soils within the framework of climate projects of the country.

Keywords: soil carbon content; Landsat; soil monitoring; arable soils; Russia.

ВВЕДЕНИЕ

Органический углерод почвы (ОУП) имеет основополагающее значение для устойчивости сельскохозяйственных почв, играющих важную роль в глобальном углеродном балансе. При этом одним из крупнейших резервуаров углерода на Земле является органическое вещество почвы (Ciais et al., 2013; Jackson et al., 2017).

Существующие методы мониторинга ОУП основаны главным образом на повторяющемся во времени отборе образцов почв по сетке. Затраты, связанные со сбором, подготовкой и хранением образцов почвы, и определением содержания углерода при прямых измерениях ОУП могут быть очень высокими. Дистанционные данные при этом рассматриваются как более дешевая и оперативная альтернатива прямым измерениям ОУП.

Опубликовано достаточно большое количество работ по дистанционной оценке содержания ОУП. Так в обзорной статье 2019 г. (Angelopoulou et al., 2019) по дистанционным методам для оценки ОУП указано, что за период 2008–2018 гг. по данной тематике было опубликовано 382 статьи (анализ проводился только для статей, включенных в базу данных Scopus). На примере 28 статей, которые в рамках данного обзора были отобраны для детального анализа, было показано, что в зависимости от сенсора и выбранного метода моделирования при использовании спутниковых данных R^2 варьирует в диапазоне 0.23–0.67, RMSE – в районе 0.08–25.2

г·кг⁻¹, RPD – в районе 1.1–2.6; при использовании аэрофотоснимков – R² варьирует в диапазоне 0.25–0.89, RMSE – в районе 0.19–8.7 г·кг⁻¹, RPD – в районе 1.14–3.15. Следует отметить, что на момент выхода обзора была найдена только одна статья по использованию БПЛА для дистанционной оценки ОУП. Значение R² для полученной модели составило 0.95, RMSE – 0.21 г·кг⁻¹.

При этом речь идет, как правило, о дистанционных данных, полученных за определенный срок. Также есть отдельные работы по использованию разновременных данных для оценки ОУП. Так Guo et al. (2021) оценивали возможность оценки ОУП на основе временных серий спутниковых данных в областях с небольшим перепадом высот. При этом в зависимости от спутниковых данных и выбранного метода моделирования R², по результатам валидации, варьирует в диапазоне 0.14–0.56, RMSE – в районе 0.2–0.33 г·кг⁻¹, RPD – в районе 1.18–1.45.

В работе Dou et al. (2019) рассматривается моделирование ОВП в почвах равнины Соннен (Китай) по разновременным спутниковым данным. При этом R² полученных моделей варьирует в диапазоне 0.57–0.76, RMSE – в районе 0.77–1.16 г·кг⁻¹.

Преимущественно в рассмотренных выше работах содержание ОУП определяется напрямую – в результате моделирования связей между спектральной отражательной способностью (COC) почв, полученной по дистанционным данным, и содержанием ОУП по результатам лабораторных анализов.

Также возможно картографирование содержания ОУП в рамках подходов цифровой почвенной картографии, когда спутниковые изображения и их производные используются в качестве одной из ковариат. Так вегетационные индексы, рассчитанные по спутниковым данным Landsat 5 TM, оказались наиболее важными параметрами при моделировании ОУП в естественных альпийских пастбищах на северо-востоке Тибетского нагорья в Китае (Yang et al., 2016). Mahmoudabadi et al. (2017) показали, что вегетационные индексы, включая NDVI, полученные по спутниковым данным, оказались более эффективными, чем отдельные каналы, при моделировании почвенных свойств, включая ОУП. Однако Schillaci et al. (2017) в полупустынном средиземном регионе обнаружили, что панхроматический канал Landsat 7 ETM+ оказался более эффек-

тивным при моделировании ОУП, чем NDVI. Kalambukattu et al. (2018) использовали спектральные индексы, рассчитанные на основе данных Landsat 8 совместно с топографической информацией для моделирования содержания ОУП и других питательных веществ.

В обзорной статье Lamichhane et al. (2019), посвященной использованию подхода SCORPAN при картографировании ОУП в рамках цифровой картографии почв, указано, что за период с 2013 по 28.02.2019 гг. по данной тематике было опубликовано 120 статей (анализ проводился для англоязычных статей, включенных в Scopus и WoS).

Однако все рассмотренные выше работы предполагают “разовое” определение содержания ОУП, которое может потенциально использоваться как точка отсчета для отслеживания изменений количества ОУП в рамках его мониторинга, но не решает саму проблему мониторинга.

Ряд работ, упоминающих мониторинг почвенного углерода с помощью дистанционных данных, также предполагает “разовое” определение ОУП и рассматривает получение моделей, описывающих связи между СОС и анализируемым свойством, с потенциальной возможностью повторного применения этих моделей.

Например, Rosero-Vlasova et al. (2019) рассматривают моделирование содержания органического вещества почв на основе лабораторных данных о СОС почвенных образцов, отобранных в районах лесных пожаров и заброшенных земель в провинции Арагон на севере Испании. Для моделирования используются такие методы, как CCR-SD (регрессия скоррелированных компонентов с пошаговым отбором переменных) и PLSR (регрессия частичных наименьших квадратов).

Shen et al. (2022) упоминают локальный мониторинг почвенного углерода. При этом в статье они главным образом рассматривают применение глубокого обучения с переносом опыта (deep transfer learning) для локализации спектроскопических моделей, полученных на основе крупных спектральных библиотек (на национальном уровне).

Таким образом, на настоящий момент накоплен достаточно большой опыт дистанционной оценки содержания ОУП. Но, если

не считать достаточно схематичные глобальные подходы, мониторинг на детальном уровне до сих пор имеет локальный характер, и построенные модели не могут быть экстраполированы на другие территории.

Цель исследования состояла в разработке стратегии унифицированного дистанционного мониторинга содержания органического углерода в пахотных горизонтах почв для всей территории России и в ее апробации.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Стратегия дистанционного мониторинга содержания органического углерода в пахотных почвах

Анализ научных публикаций показывает, что оценка содержания ОУП по дистанционным данным в настоящее время возможна только для пахотного горизонта. Модели связи содержания органического углерода в пахотном горизонте почв со спецификой изображения их открытой поверхности должны быть региональными. Построение качественных глобальных моделей на данном этапе развития науки практически невозможно. Это связано с тем, что на отражательную способность поверхности пахотных почв может оказывать влияние не только содержание органического вещества, но и другие свойства почв, такие, например, как содержание легкорастворимых солей, карбонатов, особенности минералогического состава почвы и т. п. Именно поэтому оценка содержания органического углерода в пахотном горизонте почв должна опираться на районирование, в выделах которого перечень других свойств почв, потенциально способных влиять на спектральную отражательную способность их поверхности, априори известен.

Оптимальным для территории России на данный момент выглядит использование в качестве подобного районирования контурной части Единого государственного реестра почвенных ресурсов России (ЕГРПР, 2014).

Для каждого выдела подобного районирования (по сути – выдела ЕГРПР) строится базовая карта содержания органического углерода в пахотном горизонте почв, которая является стартовой точкой дистанционного мониторинга данного компонента баланса

углерода. Для построения такой карты используется спутниковая информация за последние 3–5 лет.

На основе базовой карты содержания углерода в пахотном горизонте почв осуществляется его ежегодный дистанционный мониторинг. То есть, каждый год на основе спутниковых данных в рамках вышеизложенной стратегии проводится создание новой карты содержания углерода в пахотных горизонтах почв, и ее разница с базовой картой используется как карта изменений в содержании углерода в пахотном горизонте в текущем году относительно базового уровня.

Таким образом, многолетняя динамика содержания углерода в пахотном горизонте почв определяется на основе анализа временных рядов изображения открытой поверхности почв на спутниковых данных.

Регион исследования

Апробация стратегии проводилась на примере двух почвенных выделов Единого государственного реестра почвенных ресурсов России (ЕГРПР, 2014). Первый почвенный выдел (“Богословское”) площадью 283 199.5 га включает в себя тяжелосуглинистые и глинистые светло-серые лесные, серые лесные и темно-серые лесные почвы. Он охватывает Московскую, Тульскую и Рязанскую области (рис. 1а). Второй почвенный выдел (“Эммаусс”) площадью 93 627.8 га включает в себя дерново-подзолистые иллювиально-железистые почвы и находится на территории Тверской области (рис. 1б).

Подбор и подготовка спутниковых данных

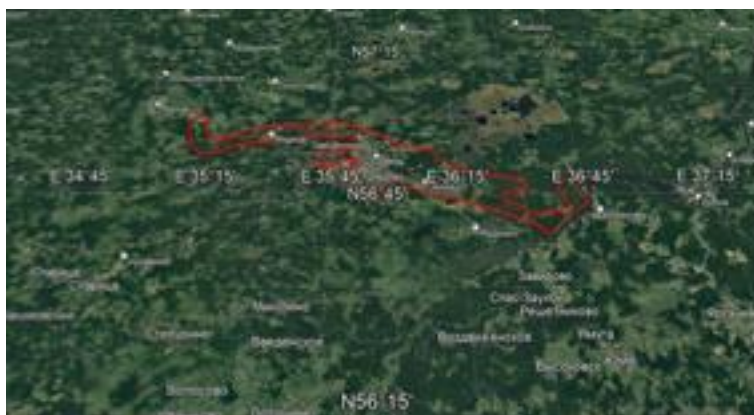
Для почвенных выделов “Богословское” и “Эммаусс” было отобрано по 9 сцен Landsat 8-9 OLI (продукт Landsat Collection 2 Level-2) за период 2017–2022 гг. (табл. 1) для построения базовой карты содержания органического углерода. Для построения карты содержания ОУП за 2023 г. для почвенного выдела “Богословское” было отобрано 4 сцены, для почвенного выдела “Эммаусс” – 3 (табл. 1).

Продукт Landsat Collection 2 Level-2 содержит атмосферно

скорректированные данные (<https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-collection-2>), поэтому дополнительной коррекции спутниковых данных не требовалось.



а)



б)

Рис. 1. Географическое расположение тестовых почвенных выделов (границы выделов показаны красным цветом): **а)** “Богословское”, **б)** “Эммаусс”.

Fig. 1. Geographical location of test soil units (boundaries of units are shown in red color): **а)** “Bogoslovskoye”, **б)** “Emmauss”.

Таблица 1. Отобранные для анализа сцены Landsat 8-9 OLI
Table 1. Selected for analysis Landsat 8-9 OLI scenes

Номер п/п	Path/row	Срок съемки	Наличие облаков (% от площади сцены)
“Богословское”			
1	178/022	17/04/2021	61.1
2	178/022	10/10/2021	<1
3	178/022	22/05/2022	12.3
4	178/022	14/11/2022	11.3
5	177/022	07/04/2020	<1
6	177/022	10/04/2021	10.7
7	176/022	02/05/2020	23.5
8	176/022	23/09/2020	<1
9	176/022	12/08/2022	<1
10	177/022	23/09/2023	<1
11	177/022	08/04/2023	7
12	178/022	30/09/2023	<1
13	178/022	17/05/2023	<1
“Эммаусс”			
1	179/020	07/09/2018	1.3
2	179/020	10/09/2019	27.7
3	179/020	10/05/2021	0
4	179/020	19/04/2022	1.6
5	179/020	25/08/2022	<1
6	180/020	16/10/2018	23.1
7	180/020	08/10/2021	0
8	180/020	18/04/2022	<1
9	180/020	11/10/2022	<1
10	179/020	16/05/2023	<1
11	179/020	25/09/2023	42
12	180/020	28/09/2023	7.8

Для маскирования облаков и их теней при их наличии использовался файл с оценкой качества в пикселе – *QA_PIXEL*. Расшифровка значений, представленных в данном файле, приведена в соответствующем руководстве (<https://www.usgs.gov/media/files/landsat-8-9-collection-2-level-2-science-product-guide>).

Выделение открытой поверхности пахотных почв

В качестве критерия отделения открытой поверхности почв от растительности для большинства сцен использовался NDVI. Пороговое значение, отделяющее открытую поверхность почвы от поверхности с растительностью, варьировало в диапазоне от 0.3 до 0.48 в зависимости от сцены. Маскирование населенных пунктов проводилось для почвенного выдела “Богословское” в основном на основе индекса MBI (Nguyen et al., 2021). Пороговое значение составило 0.27. Для почвенного выдела “Эммаус” использовались векторные маски населенных пунктов, дорог и водных объектов.

Создание базовой карты содержания органического углерода в пахотном горизонте почв

Для создания базовой карты содержания органического углерода использовался ближний инфракрасный канал Landsat 8-9 OLI. Этот канал съемки считается наиболее информативным для детектирования содержания углерода в поверхностном слое почв (Datta et al., 2022; Jin et al., 2024). Это также подтверждается и результатами наших собственных экспериментов (Грубина и др., 2020; Прудникова и др., 2023). Для каждого анализируемого выдела процедура выглядела следующим образом. Сначала для всех выбранных сцен в ближнем ИК канале были замаскированы пиксели, не относящиеся к открытой поверхности пахотных почв. Затем для пикселей, относящихся к открытой поверхности почв, определялось среднее, минимальное, максимальное значение отражения в данном канале за анализируемый период, а также стандартное отклонение. Для исключения попадания выбросов, если в пикселе отражение не попадало в диапазон “среднее $\pm$ 2 стандарт-

ных отклонения”, оно не учитывалось при определении минимума и максимума для этого пикселя. Также проводилась корректировка карты средних значений отражения в ближнем ИК канале.

После чего для анализируемого выдела районирования определялось минимальное и максимальное отражение в ближнем ИК канале. Полученные значения использовались для моделирования содержания органического углерода. При этом считалось, что при минимальном отражении содержание органического углерода находится на таком уровне, когда органическое вещество полностью обволакивает минеральные зерна (6% и выше), а при максимальном – содержание органического углерода близко к 0% (например, участки выхода почвообразующих пород или безгумусного горизонта почв на поверхность).

В нашем подходе анализируются два варианта регрессионной зависимости между отражением в ближнем ИК диапазоне и содержанием органического углерода: 1) линейная; 2) экспоненциальная. Это обусловлено тем, что именно эти два вида зависимости наиболее широко используются в научной литературе. Линейная модель достаточно часто и успешно использовалась в разных исследованиях при построении локальных моделей для определения содержания органического вещества и органического углерода (Datta et al., 2022; Jin et al., 2024). В то же время в ряде исследований было показано, что на больших территориях на разных почвах на территории России оптимальная зависимость имеет экспоненциальный вид (Орлов и др., 2001; Караванова, 2003):

$$\rho\text{NIR} = A \cdot e^{-k \cdot H} + \rho\text{H},$$

где ρNIR – отражение в ближнем ИК диапазоне (%), A – разница между отражением при нулевом содержании ОУП и отражением при его максимальном содержании, когда гумус полностью обволакивает минеральные частицы (%), H – содержание органического углерода (%), k – выражает скорость снижения отражательной способности по мере увеличения содержания ОУП, ρH – отражение при максимальном содержании ОУП, когда гумус полностью обволакивает минеральные частицы.

Откуда содержание органического углерода выражается следующим образом:

$$OC = (-1/k) \cdot \ln((pNIR - pH)/A).$$

Подбор параметров моделей в обоих случаях проводился на двух точках в программе MS Excel. В случае линейной функции использовались коэффициенты линии тренда, проведенной через две точки. В случае экспоненциальной функции учитывался установленный для параметров функции диапазон значений для разных почв (Орлов и др., 2001). В частности, по литературным данным, параметр А изменяется в диапазоне 20–50%, k – от 0.06 до 0.15 (снижаясь от черноземов к дерново-подзолистым почвам), pH – от 6 до 9%.

Полученные модели использовались для построения базовой карты содержания органического углерода в пахотных почвах анализируемых выделов. Модели применялись к картам среднего скорректированного отражения открытой поверхности пахотных почв в ближнем ИК канале. Для каждого выдела районирования выбиралась наиболее надежная модель, которая могла быть или линейной, или экспоненциальной.

Работа со спутниковыми данными велась в пакете программ ILWIS v.3.3 (<https://www.itc.nl/ilwis/>). Для обработки спутниковых данных на территорию всей страны используется Google Earth Engine (<https://earthengine.google.com/>).

Верификация базовой карты содержания органического углерода

Для верификации базовых карт анализируемых выделов использовались полевые данные, собранные на территории анализируемых выделов (63 точки с данными о содержании органического углерода пахотного горизонта почв для выдела “Богословское” и 5 точек – для выдела “Эммаусс”). Оценивалась разница между содержанием органического углерода, полученным по результатам лабораторных анализов, и содержанием органического углерода на базовой карте. Для чего рассчитывалась среднеквадратическая ошибка предсказания.

Ежегодный дистанционный мониторинг содержания органического углерода в пахотном горизонте почв

Основой мониторинга выступала базовая карта содержания органического углерода. Для создания карты за 2023 г. для анализируемых выделов использовались спутниковые данные за весенний и осенний периоды года исследований, прошедшие предобработку (атмосферная коррекция, маскирование облаков и их теней). Открытая поверхность почв по отобранным спутниковым данным выделялась так же, как и при создании базовой карты. Затем для пикселей с открытой поверхностью почв определялось среднее значение отражения в ближнем ИК канале за анализируемый год, которое пересчитывалось в содержание органического углерода на основе тех же моделей, которые использовались при создании базовой карты. После чего определялась арифметическая разница между содержанием органического углерода на базовой карте и в анализируемом году.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Базовая карта содержания органического углерода в пахотном горизонте почв выдела “Богословское”

На основе анализа спутниковых данных было установлено, что минимальное значение отражения в ближнем ИК диапазоне для данного почвенного выдела, соответствующее содержанию органического углерода, при котором гумус полностью обволакивает минеральные частицы (6%), составило 0.0384, а максимальное значение отражения, соответствующее 0% органического углерода – 0.5206. С учетом данных значений модели для пересчета скорректированного среднего отражения в ближнем ИК диапазоне в содержание органического углерода выглядели следующим образом:

1) линейная функция:

$$\text{ОУП} = -12.18 \cdot \rho\text{NIR} + 6.34,$$

где ОУП – содержание органического углерода (%), ρNIR – отражение в ближнем ИК диапазоне (доли от 1).

2) экспоненциальная функция:

$$\rho\text{NIR} \cdot 100 = 55 \cdot e^{-0.55 \cdot \text{ОУП}} + 2.1.$$

На основе предыдущего уравнения содержание ОУП рассчитывалось по формуле:

$$\text{ОУП} = (-1/0.55) \cdot \ln((\rho\text{NIR} \cdot 100 - 2.1)/55).$$

Построенные на основе линейной и экспоненциальной функций базовые карты содержания органического углерода в пахотном горизонте почв анализируемого выдела представлены ниже (рис. 2).

Анализ гистограмм распределения количества пикселей по значениям содержания органического углерода показал, что при применении линейной функции преобладают пиксели с более высоким значением содержания ОУП (4–6%), чем при использовании экспоненциальной функции (2–3%) (рис. 3).

Выдел “Эммаусс”

По результатам анализа спутниковых данных минимальное значение отражения в ближнем ИК диапазоне, соответствующее содержанию ОУП, при котором гумус полностью обволакивает минеральные частицы (6%), составило 0.0204, а максимальное значение отражения, соответствующее 0% ОУП, – 0.4495. Пересчет скорректированного среднего отражения в ближнем ИК диапазоне в содержание ОУП с учетом данных значений проводился на основе следующих функций:

1) линейная функция:

$$\text{ОУП} = -13.98 \cdot \rho\text{NIR} + 6.29,$$

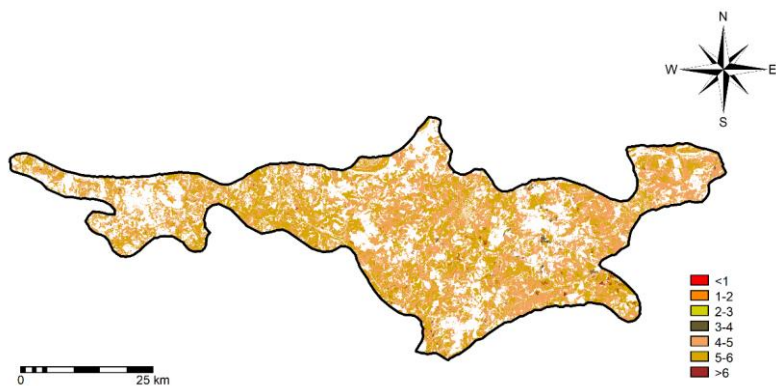
где ОУП – содержание органического углерода (%), ρNIR – отражение в ближнем ИК диапазоне (доли от 1).

2) экспоненциальная функция:

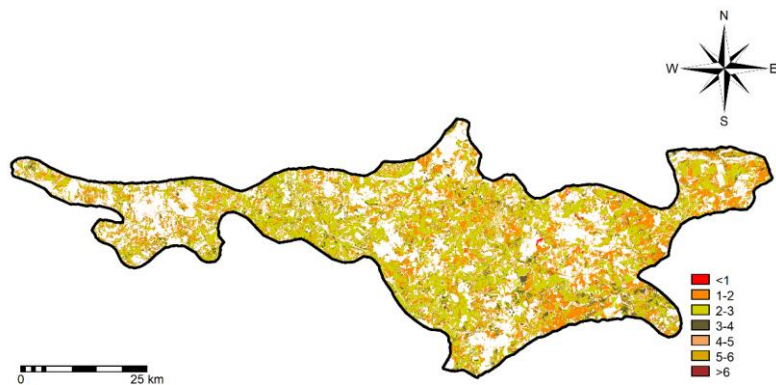
$$\rho\text{NIR} \cdot 100 = 43 \cdot e^{-0.95 \cdot \text{ОУП}} + 1.9,$$

На основе предыдущего уравнения содержание ОУП рассчитывалось следующим образом:

$$\text{ОУП} = (-1/0.95) \cdot \ln((\rho\text{NIR} \cdot 100 - 1.9)/43).$$



а)



б)

Рис. 2. Базовая карта содержания ОУП в пахотном горизонте почв участка “Богословское”, построенная на основе а) линейной функции, б) экспоненциальной функции.

Fig. 2. Basic map of SOC content in arable soil horizon of test site “Bogoslovskoye”, compiled based on а) linear function; б) exponential function.

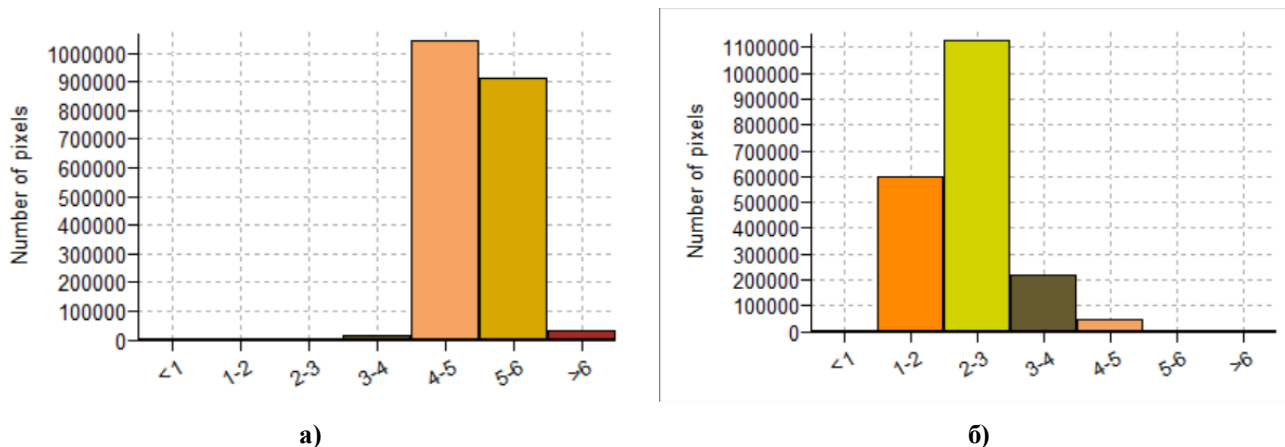


Рис. 3. Гистограммы распределения количества пикселей по значениям содержания ОУП на базовых картах участка “Богословское”, построенных на основе **а)** линейной и **б)** экспоненциальной функций.

Fig. 3. Histograms of the distribution of the number of pixels according to the values of SOC content on the basic maps of test site “Bogoslowskoe”, compiled base on **a)** linear and **b)** exponential functions.

В результате на основе линейной и экспоненциальной функций были построены базовые карты содержания органического углерода в пахотном горизонте почв анализируемого выдела (рис. 4).

Анализ гистограмм распределения количества пикселей по значениям содержания ОУП показал, что при применении линейной функции преобладают пиксели с более высоким значением содержания ОУП (2–3%), чем при использовании экспоненциальной функции (<1–2%) (рис. 5).

Верификация базовой карты содержания органического углерода

Выдел “Богословское”

Для анализируемого почвенного выдела ошибка предсказания в случае использования экспоненциальной функции составила 1.02% ОУП, при использовании линейной функции – 2.36% ОУП (рис. 6).

Выдел “Эммаусс”

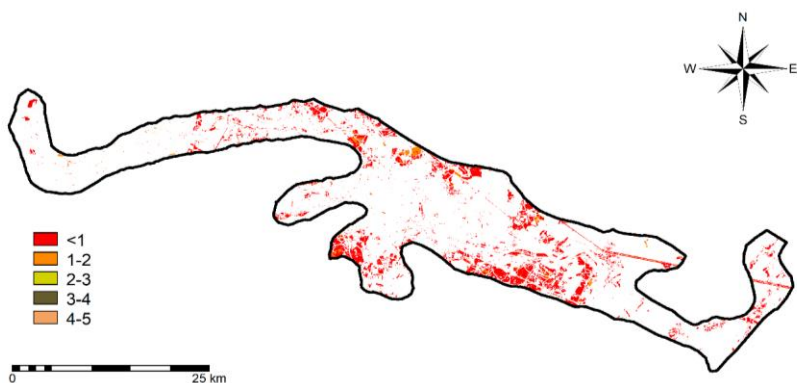
Для почвенного выдела “Эммаусс” ошибка для экспоненциальной функции составила 1.65% ОУП, для линейной – 0.79% ОУП (рис. 7).

Карта изменения содержания органического углерода

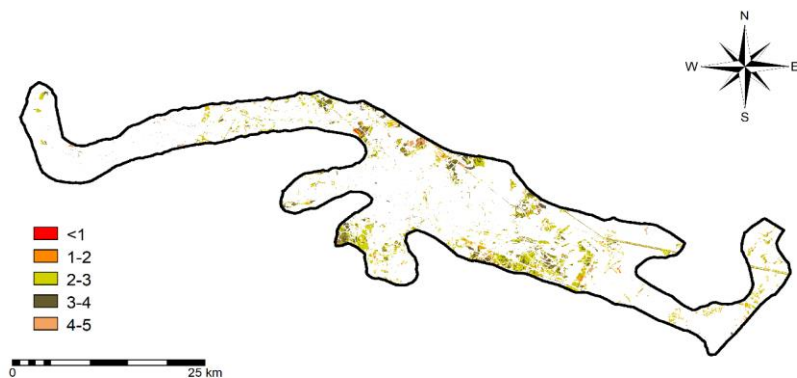
Выдел “Богословское”

Карта изменения содержания органического углерода в пахотном слое почв в 2023 г., по сравнению с базовой картой для почвенного выдела “Богословское”, представлена ниже (рис. 8). При построении этой карты использовалась более качественная экспоненциальная модель.

По результатам проведенной оценки на территории почвенного выдела “Богословское” преобладают участки, на которых изменения содержания органического углерода в пахотном слое почв в 2023 г., по сравнению с базовой картой, не превышают 1% (рис. 9).



а)



б)

Рис. 4. Базовая карта содержания ОУП в пахотном горизонте почвучастка “Эммаусс”, построенная на основе а) линейной функции, б) экспоненциальной функции.

Fig. 4. Basic map of SOC content in arable soil horizon of test site “Emmauss”, compiled based on а) linear function; б) exponential function.

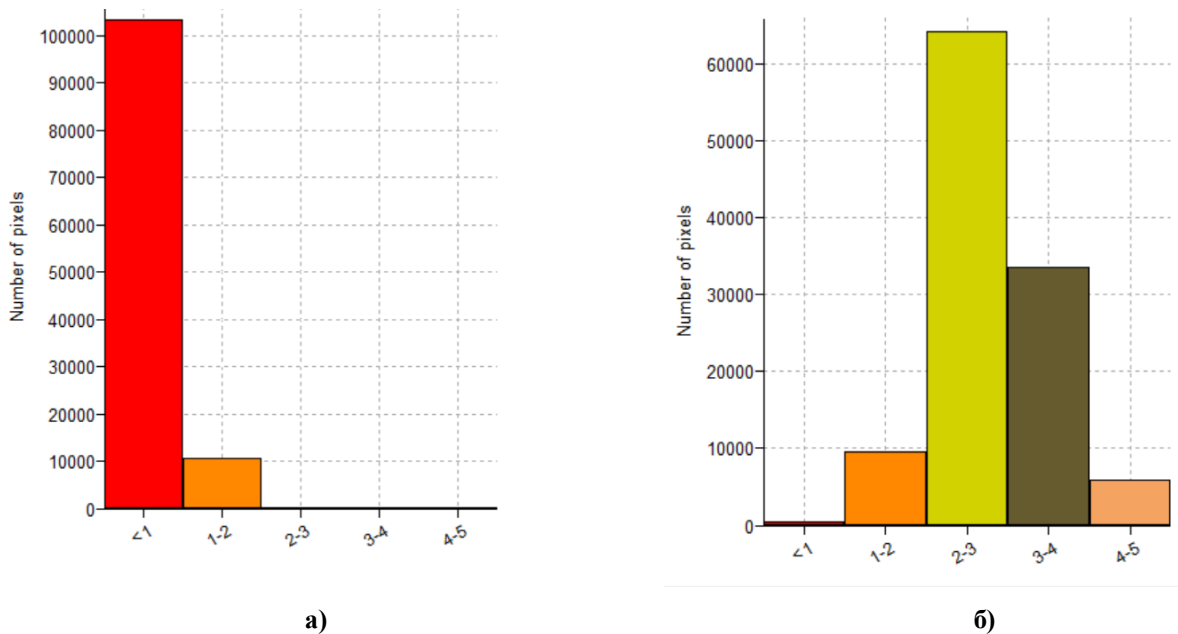
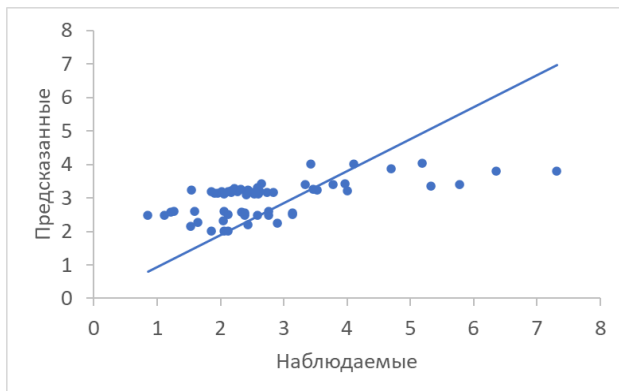
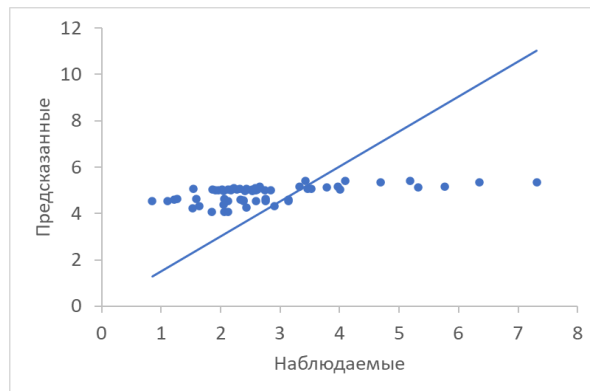


Рис. 5. Гистограммы распределения количества пикселей по значениям содержания ОУП на базовых картах участка “Эммаусс”, построенных на основе **а)** линейной и **б)** экспоненциальной функций.

Fig. 5. Histograms of the distribution of the number of pixels according to the values of SOC content on the basic maps of test site “Emmauss”, compiled base on **а)** linear and **б)** exponential functions.



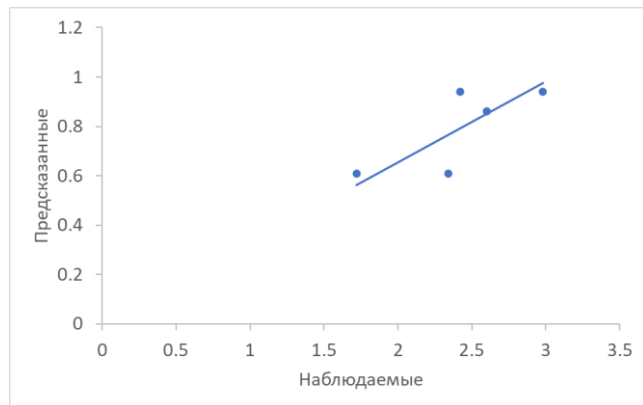
а)



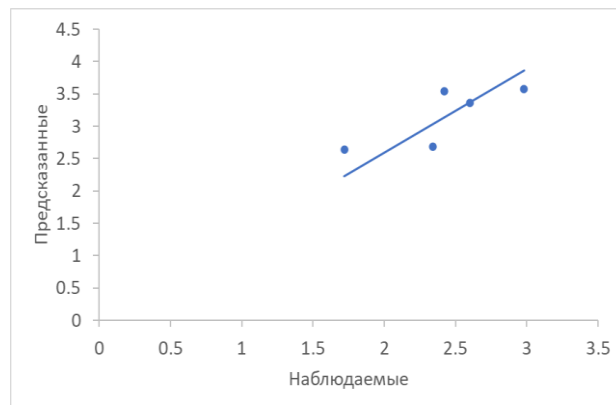
б)

Рис. 6. Графики Наблюдаемые-Предсказанные значения содержания ОУП («Богословское») для **а)** экспоненциальной функции; **б)** линейной функции.

Fig. 6. Graphs Observed-Predicted values of SOC content (“Bogoslovskoye”) for **a)** exponential function; **b)** linear function.



а)



б)

Рис. 7. Графики Наблюдаемые-Предсказанные значения содержания ОУП (“Эммаусс”) для **а)** экспоненциальной функции; **б)** линейной функции.

Fig. 7. Graphs Observed-Predicted values of SOC content (“Emmauss”) for **a)** exponential function; **b)** linear function.

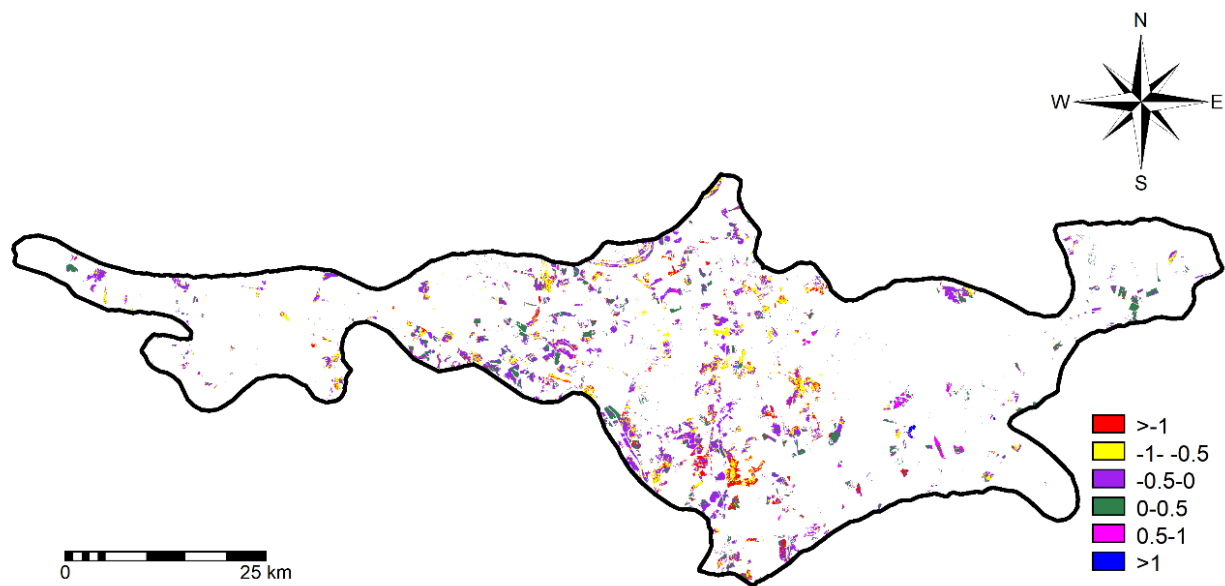


Рис. 8. Карта изменения содержания органического углерода в пахотном слое почв в 2023 г. по сравнению с базовой картой для выдела “Богословское”.

Fig. 8. Map of change in the organic carbon content in the arable layer of soils in 2023 compared to the baseline map for the “Bogoslovskoye” unit.

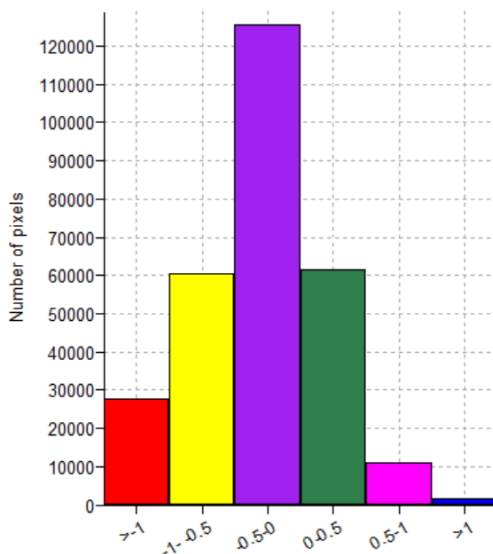


Рис. 9. Гистограмма распределения количества пикселей по классам изменения содержания ОУП в текущем году по сравнению с базовой картой для выдела “Богословское”.

Fig. 9. Histogram of pixel number distribution by classes of SOC content change in the current year compared to the base map for the “Bogoslovskoye” unit.

Выдел “Эммаусс”

Карты изменения содержания органического углерода в пахотном слое почв в 2023 г. по сравнению с базовой картой для почвенного выдела “Эммаусс” представлены ниже (рис. 10). При построении этой карты использовалась более качественная линейная модель.

По результатам проведенной оценки на территории почвенного выдела “Эммаусс” в целом преобладают участки, на которых изменения содержания органического углерода в пахотном слое почв в 2023 г., по сравнению с базовой картой, не превышают 1% (рис. 11).

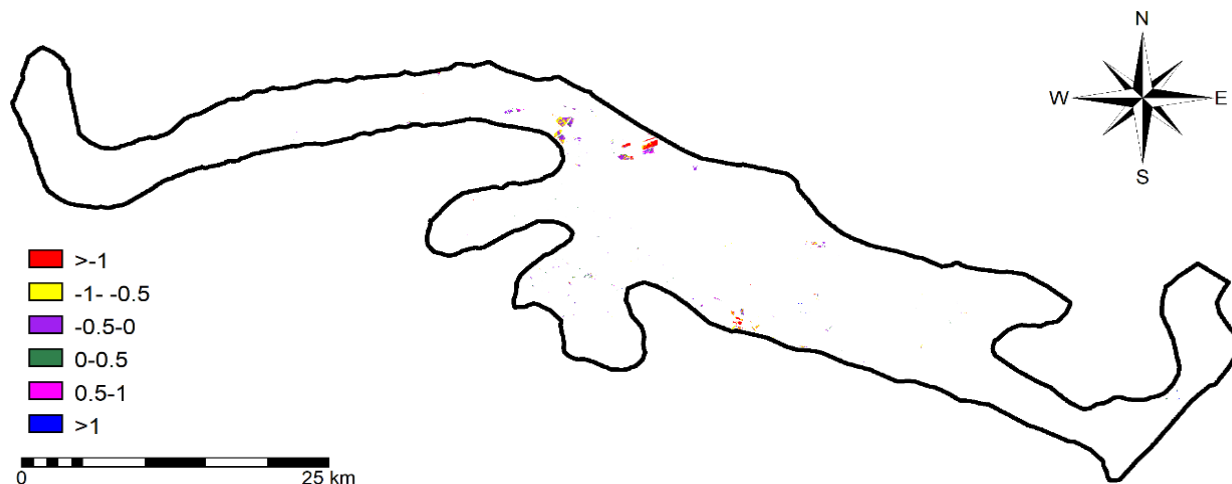


Рис. 10. Карта изменения содержания органического углерода в пахотном слое почв в 2023 г. по сравнению с базовой картой для выдела “Эммаусс”.

Fig. 10. Map of the change in organic carbon content in the tillage layer of soils in 2023 compared to the baseline map for the “Emmauss” unit.

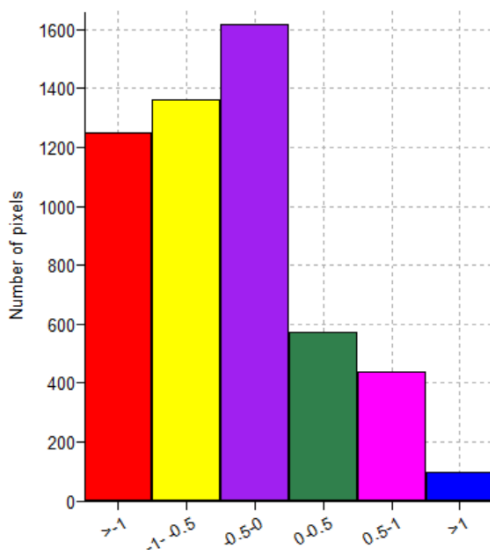


Рис. 11. Гистограмма распределения количества пикселей по классам изменения содержания ОУП в текущем году по сравнению с базовой картой для выдела “Эммаусс”.

Fig. 11. Histogram of the distribution of the number of pixels by class of change in SOC content in the current year compared to the base map for the “Emmauss” unit.

Апробация стратегии на примере двух выделов ЕГРПР показала, что она вполне может быть использована в качестве основы для построения системы спутникового мониторинга содержания углерода в пахотных почвах России. Она отличается простотой, оперативностью и дешевизной. Конечно, погрешность получаемой информации достаточно велика по сравнению с данными наземных обследований (Хитров и др., 2023), или при построении локальных моделей для предсказания содержания углерода в почвах (Le Noë et al., 2023). Но она может быть постепенно уменьшена при накоплении данных полевых обследований.

Наиболее надежно на основе предложенных подходов детектируются сильные изменения в содержании углерода, связанные, например, с активной эрозией почв, с глубокой вспашкой, или с антропогенным нарушением поверхности почв в результате проведения мелиоративных мероприятий, планировкой поверхности и т. п.

Использование стандартных моделей связи отражательной способности почв с содержанием органического вещества для каждого выдела ЕГРПР позволяет уже на данном этапе построить базовую карту на пахотные земли всей страны. Фрагмент такой карты показан на рисунке 12.

Безусловно, качество этой карты не может быть очень высоким, но, по предварительным данным, оно лучше, чем оценки, получаемые на основе традиционно составленных почвенных карт (например, ЕГРПР или FAO, 2022). Но, конечно же, такой вывод требует дополнительных подтверждений фактическими данными. Более того, качество карт может быть существенно улучшено при уточнении моделей в каждом конкретном выделе ЕГРПР и при сборе дополнительных полевых данных.

Основным недостатком разработанной стратегии является то, что отсутствует возможность одновременного анализа всех пахотных полей страны. Несмотря на то, что при анализе используются данные весенней и осенней съемки, тем не менее часть полей и в эти периоды года остается под растительностью, и оценка отражательной способности поверхности почв для этих полей невозможна. При осреднении результатов, получаемых в конкретном году для выделов районирования, данная проблема может быть частично элиминирована, но не до конца. Это является одним из источников ошибок при использовании данной стратегии.

Другим источником может быть то, что при уточнении моделей для каждого выдела используются полевые данные для отдельных точек, а моделирование ведется для пикселей размером 30·30 м на местности. Известно, что содержание углерода в пахотных горизонтах почв достаточно сильно варьирует в пространстве даже на коротких расстояниях (Самсонова и др., 2019; Đurđević et al., 2019; Schuster et al., 2023).

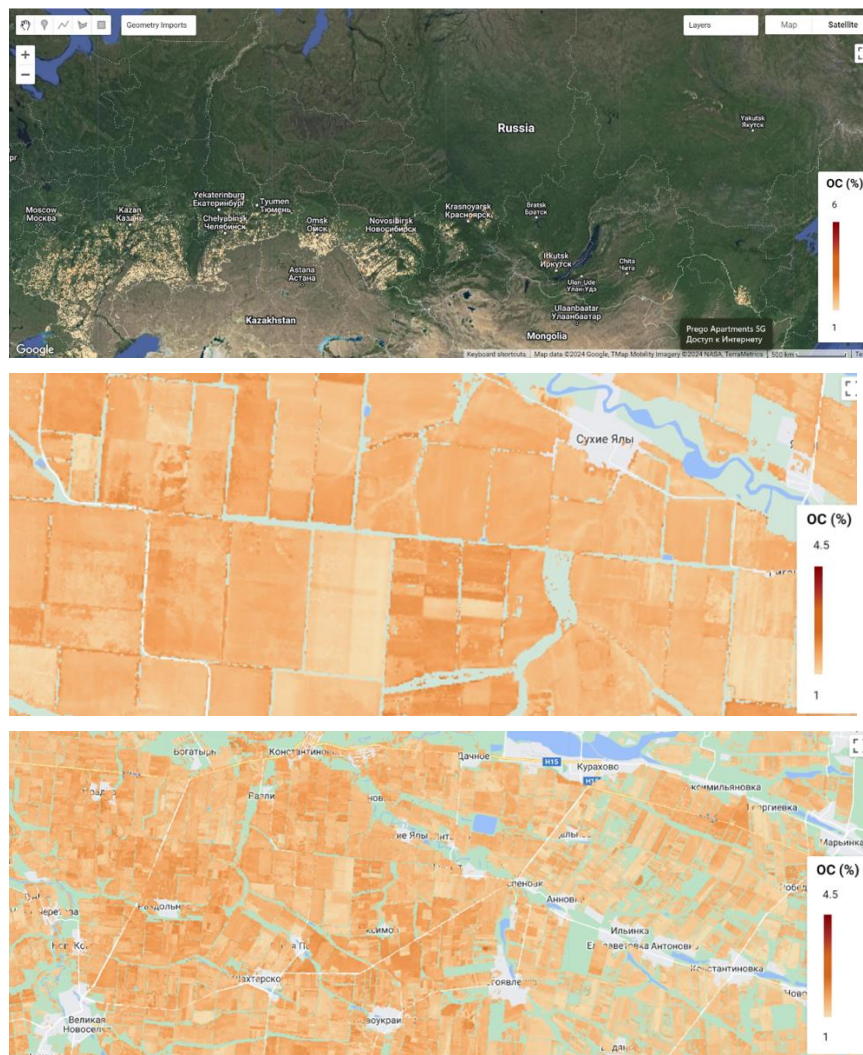


Рис. 12. Фрагменты базовой карты содержания органического углерода в пахотных почвах России, построенной на основе разработанных подходов.

Рис. 12. Fragments of the base map of organic carbon content in arable soils of Russia, built on the basis of the developed approaches.

И это варьирование в предложенном подходе теоретически можно учесть путем сбора большого количества полевых данных, но трудоемкость и затратность при этом делают подобную работу для больших территорий практически невыполнимой.

Еще одним источником ошибок может являться недостаточная точность выделения полей с открытой поверхностью почв. Некоторые авторы рекомендуют для этого подходы, базирующиеся не на использовании NDVI, а на других принципах (Dematté et al., 2020; Panahi et al., 2024). Теоретически использование других подходов может повысить точность выделения открытой поверхности почв, но это требует дополнительных исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На примере двух тестовых участков была проведена демонстрация использования стратегии дистанционного мониторинга содержания органического углерода в пахотном горизонте почв. На основе анализа спутниковых данных за период 2017–2022 гг. для каждого из тестовых участков были построены карты, отражающие базовое содержание органического углерода, которое является точкой отсчета для дальнейшего мониторинга данного параметра бюджета углерода. Верификация базовых карт показала, что ошибка предсказания составляет 1.02% для почвенного выдела “Богословское” и 0.79% для почвенного выдела “Эммаусс”. Также по спутниковым данным были построены карты содержания органического углерода за 2023 г. и была проведена оценка изменения в содержании данного параметра по сравнению с базовым. В целом для обоих тестовых участков большая часть изменений находилась в пределах 1%.

Предполагается, что точность моделирования будет ежегодно возрастать с накоплением полевых данных о содержании углерода в пахотном горизонте почв, а также с уточнением моделей в каждом выделе районирования.

Подобный подход может быть использован для организации ежегодного дистанционного мониторинга баланса углерода в пахотных почвах в рамках климатических проектов страны (Иванов и др., 2021).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грубина П.Г., Савин И.Ю., Прудникова Е.Ю. Возможности использования данных тепловой съемки для детектирования основных параметров плодородия пахотных почв // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2020. Вып. 105. С. 146–172. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-105-146-172>.
2. Единый государственный реестр почвенных ресурсов России / гл. ред. А.Л. Иванов, С.А. Шоба). М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 2014. 760 с.
3. Иванов А.Л., Савин И.Ю., Столбовой В.С., Духанин Ю.А., Козлов Д.Н. Методологические подходы формирования единой Национальной системы мониторинга и учета баланса углерода и выбросов парниковых газов на землях сельскохозяйственного фонда Российской Федерации // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2021. Вып. 108. С. 175–218. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2021-108-175-218>.
4. Караванова Е.И. Оптические свойства почв и их природа. М.: МГУ, 2003. 153 с.
5. Орлов Д.С., Суханова Н.И., Розанова М.С. Спектральная отражательная способность почв и их компонентов. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2001. 175 с.
6. Прудникова Е.Ю., Савин И.Ю., Грубина П.Г. Спутниковая оценка агрономически важных свойств пахотных почв с учетом состояния их поверхности // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2023. Вып. 115. С. 129–159. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2023-115-129-159>.
7. Самсонова В.П., Кондрашкина М.И., Кротов Д.Г. Пространственное многообразие агрохимических свойств пахотных почв (на примере Трубчевского района Брянской области) // Вестник Московского Университета. Серия 17. Почвоведение. 2019. № 2. С. 28–35.
8. 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.
9. Angelopoulou T., Tziolas N., Balafoutis A., Zalidis G., Bochtis D. Remote sensing techniques for soil organic carbon estimation: A review // Remote Sensing. 2019. Vol. 11(6). P. 676.
10. Ciais P., Gasser T., Paris J.D., Caldeira K., Raupach M.R., Canadell J.G., Gitz V. Attributing the increase in atmospheric CO₂ to emitters and absorbers // Nature Climate Change. 2013. Vol. 3(10). P. 926–930.
11. Datta D., Paul M., Murshed M., Teng S.W., Schmidtke L. Soil moisture,

organic carbon, and nitrogen content prediction with hyperspectral data using regression models // *Sensors (Switzerland)*. 2022. Vol. 22(20). Article 7998. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22207998>.

12. Demattê J.A., Safanelli J.L., Poppiel R.R., Rizzo R., Silvero N.E.Q., Mendes W.D.S., Lisboa C.J.D.S. Bare earth's surface spectra as a proxy for soil resource monitoring // *Scientific reports*. 2020. Vol. 10(1). P. 1–11.

13. Dou X., Wang X., Liu H., Zhang X., Meng L., Pan Y., Cui Y. Prediction of soil organic matter using multi-temporal satellite images in the Songnen Plain, China // *Geoderma*. 2019. Vol. 356. 113896.

14. Đurđević B., Jug I., Jug D., Bogunović I., Vukadinović V., Stipešević B. et al. Spatial variability of soil organic matter content in Eastern Croatia assessed using different interpolation methods // *Int. Agrophys.* 2019. Vol. 33(1). P. 31–39. DOI: <https://doi.org/10.31545/intagr/104372>.

15. FAO. 2022. Global Soil Organic Carbon Map – GSOCmap v.1.6. Technical report. Rome. DOI: <https://doi.org/10.4060/cb9015en>.

16. Guo L., Fu P., Shi T., Chen Y., Zeng C., Zhang H., Wang S. Exploring influence factors in mapping soil organic carbon on low-relief agricultural lands using time series of remote sensing data // *Soil and Tillage Research*. 2021. Vol. 210. 104982.

17. Jackson R.B., Lajtha K., Crow S.E., Hugelius G., Kramer M.G., Piñeiro G. The ecology of soil carbon: pools, vulnerabilities, and biotic and abiotic controls // *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*. 2017. Vol. 48(1). P. 419–445.

18. Jin Y., Sharifi A., Li Z., Chen S., Zeng S., Zhao S. Carbon emission prediction models: A review // *Science of The Total Environment*. 2024. Vol. 927. 172319. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172319>.

19. Kalambukattu J.G., Kumar S., Arya Raj R. Digital soil mapping in a Himalayan watershed using remote sensing and terrain parameters employing artificial neural network model // *Environmental earth sciences*. 2018. Vol. 77(5). P. 1–14.

20. Lamichhane S., Kumar L., Wilson B. Digital soil mapping algorithms and covariates for soil organic carbon mapping and their implications: A review // *Geoderma*. 2019. Vol. 352. P. 395–413.

21. Le Noë J., Manzoni S., Abramoff R. et al. Soil organic carbon models need independent time-series validation for reliable prediction // *Commun Earth Environ*. 2023. Vol. 4(158). DOI: <https://doi.org/10.1038/s43247-023-00830-5>.

22. Mahmoudabadi E., Karimi A., Haghnia G.H., Sepehr A. Digital soil mapping using remote sensing indices, terrain attributes, and vegetation features in the rangelands of northeastern Iran // *Environmental monitoring and assessment*. 2017. Vol. 189(10). P. 1–20.

23. *Nguyen C.T., Chidthaisong A., Kieu Diem P., Huo L-Z.* A Modified bare soil index to identify bare land features during agricultural fallow-period in Southeast Asia Using Landsat 8 // *Land*. 2021. Vol. 10(3). P. 231. DOI: <https://doi.org/10.3390/land10030231>.
24. *Panahi H., Azizi Z., Kiadaliri H., Almodaresi S.A., Aghamohamadi H.* Bare soil detecting algorithms in western Iran woodlands using remote sensing // *Smart Agricultural Technology*. 2024. Vol. 7. 100429. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100429>.
25. *Rosero- Vlasova O.A., Vlassova L., Pérez- Cabello F., Montorio R., Nadal- Romero E.* Soil organic matter and texture estimation from visible–near infrared–shortwave infrared spectra in areas of land cover changes using correlated component regression // *Land Degradation & Development*. 2019. Vol. 30(5). P. 544–560.
26. *Schillaci C., Lombardo L., Saia S., Fantappiè M., Märker M., Acutis M.* Modelling the topsoil carbon stock of agricultural lands with the Stochastic Gradient Treeboost in a semi-arid Mediterranean region // *Geoderma*. 2017. Vol. 286. P. 35–45.
27. *Schuster J., Mittermayer M., Maidl F.X. et al.* Spatial variability of soil properties, nitrogen balance and nitrate leaching using digital methods on heterogeneous arable fields in southern Germany // *Precision Agric*. 2023. Vol. 24. P. 647–676. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11119-022-09967-3>.
28. *Shen Z., Ramirez-Lopez L., Behrens T., Cui L., Zhang M., Walden L., ... Rossel R.A.V.* Deep transfer learning of global spectra for local soil carbon monitoring // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2022. Vol. 188. P. 190–200.
29. *Yang R.M., Zhang G.L., Liu F., Lu Y.Y., Yang F., Yang F., ... Li D.C.* Comparison of boosted regression tree and random forest models for mapping topsoil organic carbon concentration in an alpine ecosystem // *Ecological Indicators*. 2016. Vol. 60. P. 870–878.

REFERENCES

1. Grubina P.G., Savin I.Yu., Prudnikova E.Yu., The possibilities of using thermal infrared imaging data for detecting the main parameters of arable soil fertility, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2020, Vol. 105, pp. 146–172, DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-105-146-172>.
2. Ivanov A.L., Shoba S.A. (Eds.), *Edinyj gosudarstvennyj reestr pochvennyh resursov Rossii* (The Unified State Register of Soil Resources of Russia), Moscow: Pochvennyj institut im. V.V. Dokuchaeva, 2014, 760 p.
3. Ivanov A.L., Savin I.Yu., Stolbovoy V.S., Dukhanin Yu.A., Kozlov D.N. Methodological approaches to the formation of a unified national system of

monitoring and accounting of carbon balance and greenhouse gas emissions on lands of the agricultural fund of the Russian Federation, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2021, Vol. 108, pp. 175–218, DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2021-108-175-218>.

4. Karavanova E.I., *Opticheskie svojstva pochv i ih priroda* (Optical properties of soils and their nature), Moscow: MSU, 2003, 153 p.

5. Orlov D.S., Sukhanova N.I., Rozanova M.S., *Spektral'naja otrazhatel'naja sposobnost' pochv i ih komponentov* (Spectral reflectivity of soils and their components) Moscow: Izd-vo Mosk. un-ta, 2001, 175 p.

6. Prudnikova E.Yu., Savin I.Yu., Grubina P.G., Satellite based assessment of agronomically important properties of agricultural soils with consideration of their surface state, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2023, Vol. 115, pp. 129–159, DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2023-115-129-159>.

7. Samsonova V.P., Kondrashkina M.I., Krotov D.G., Prostranstvennoe mnogoobrazie agrohimicheskikh svojstv pahotnykh pochv (na primere Trubchevskogo rajona Brjanskoj oblasti) (Spatial diversity of agrochemical properties of arable soils (on the example of Trubchevsky district of Bryansk region)), *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya 17. Pochvovedenie*, 2019, No. 2, pp. 28–35.

8. Khitrov N.B., Nikitin D.A., Ivanova E.A., Semenov M.V., Prostranstvenno-vremennaja izmenchivost' soderzhanija i zapasov organicheskogo veshhestva pochvy: analiticheskij obzor (Spatial and temporal variability of the content and reserves of soil organic matter: an analytical review), *Pochvovedenie*, 2023, No. 12, pp. 1493–1521.

9. Angelopoulou T., Tziolas N., Balafoutis A., Zalidis G., Bochtis D., Remote sensing techniques for soil organic carbon estimation: A review, *Remote Sensing*, 2019, Vol. 11(6), pp. 676.

10. Ciais P., Gasser T., Paris J.D., Caldeira K., Raupach M.R., Canadell J.G., Gitz V., Attributing the increase in atmospheric CO₂ to emitters and absorbers, *Nature Climate Change*, 2013, Vol. 3(10), pp. 926–930.

11. Datta D., Paul M., Murshed M., Teng S.W., Schmidtke L., Soil moisture, organic carbon, and nitrogen content prediction with hyperspectral data using regression models, *Sensors* (Switzerland), 2022, Vol. 22(20), Article 7998, DOI: <https://doi.org/10.3390/s22207998>.

12. Demattê J.A., Safanelli J.L., Poppiel R.R., Rizzo R., Silvero N.E.Q., Mendes W.D.S., Lisboa C.J.D.S., Bare earth's surface spectra as a proxy for soil resource monitoring, *Scientific reports*, 2020, Vol. 10(1), pp. 1–11.

13. Dou X., Wang X., Liu H., Zhang X., Meng L., Pan Y., Cui Y., Prediction of soil organic matter using multi-temporal satellite images in the Songnen Plain, China, *Geoderma*, 2019, Vol. 356, 113896.

14. Đurđević B., Jug I., Jug D., Bogunović I., Vukadinović V., Stipešević B. et

- al., Spatial variability of soil organic matter content in Eastern Croatia assessed using different interpolation methods, *Int. Agrophys.*, 2019, Vol. 33(1), pp. 31–39, DOI: <https://doi.org/10.31545/intagr/104372>.
15. FAO. Global Soil Organic Carbon Map – GSOCmap v.1.6. Technical report, Rome, 2022, DOI: <https://doi.org/10.4060/cb9015en>.
16. Guo L., Fu P., Shi T., Chen Y., Zeng C., Zhang H., Wang S., Exploring influence factors in mapping soil organic carbon on low-relief agricultural lands using time series of remote sensing data, *Soil and Tillage Research*, 2021, Vol. 210, 104982.
17. Jackson R.B., Lajtha K., Crow S.E., Hugelius G., Kramer M.G., Piñeiro G., The ecology of soil carbon: pools, vulnerabilities, and biotic and abiotic controls, *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2017, Vol. 48(1), pp. 419–445.
18. Jin Y., Sharifi A., Li Z., Chen S., Zeng S., Zhao S., Carbon emission prediction models: A review, *Science of The Total Environment*, 2024, Vol. 927, 172319, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172319>.
19. Kalambukattu J.G., Kumar S., Arya Raj R., Digital soil mapping in a Himalayan watershed using remote sensing and terrain parameters employing artificial neural network model, *Environmental earth sciences*, 2018, Vol. 77(5), pp. 1–14.
20. Lamichhane S., Kumar L., Wilson B., Digital soil mapping algorithms and covariates for soil organic carbon mapping and their implications: A review, *Geoderma*, 2019, Vol. 352, pp. 395–413.
21. Le Noë J., Manzoni S., Abramoff R. et al., Soil organic carbon models need independent time-series validation for reliable prediction, *Commun Earth Environ.*, 2023, Vol. 4(158), DOI: <https://doi.org/10.1038/s43247-023-00830-5>.
22. Mahmoudabadi E., Karimi A., Haghnia G.H., Sepehr A., Digital soil mapping using remote sensing indices, terrain attributes, and vegetation features in the rangelands of northeastern Iran, *Environmental monitoring and assessment*, 2017, Vol. 189(10), pp. 1–20.
23. Nguyen C.T., Chidthaisong A., Kieu Diem P., Huo L-Z., A Modified bare soil index to identify bare land features during agricultural fallow-period in Southeast Asia Using Landsat 8, *Land*, 2021, Vol. 10(3), pp. 231, DOI: <https://doi.org/10.3390/land10030231>.
24. Panahi H., Azizi Z., Kiadaliri H., Almodaresi S.A., Aghamohamadi H., Bare soil detecting algorithms in western Iran woodlands using remote sensing, *Smart Agricultural Technology*, 2024, Vol. 7, 100429, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100429>.
25. Rosero- Vlasova O.A., Vlassova L., Pérez- Cabello F., Montorio R., Nadal- Romero E., Soil organic matter and texture estimation from visible–

near infrared–shortwave infrared spectra in areas of land cover changes using correlated component regression, *Land Degradation & Development*, 2019, Vol. 30(5), pp. 544–560.

26. Schillaci C., Lombardo L., Saia S., Fantappiè M., Märker M., Acutis M., Modelling the topsoil carbon stock of agricultural lands with the Stochastic Gradient Treeboost in a semi-arid Mediterranean region, *Geoderma*, 2017, Vol. 286, pp. 35–45.

27. Schuster J., Mittermayer M., Maidl F.X. et al., Spatial variability of soil properties, nitrogen balance and nitrate leaching using digital methods on heterogeneous arable fields in southern Germany, *Precision Agric.*, 2023, Vol. 24, pp. 647–676, DOI: <https://doi.org/10.1007/s11119-022-09967-3>.

28. Shen Z., Ramirez-Lopez L., Behrens T., Cui L., Zhang M., Walden L., ... Rossel R.A.V., Deep transfer learning of global spectra for local soil carbon monitoring, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2022, Vol. 188, pp. 190–200.

29. Yang R.M., Zhang G.L., Liu F., Lu Y.Y., Yang F., Yang F., ... Li D.C., Comparison of boosted regression tree and random forest models for mapping topsoil organic carbon concentration in an alpine ecosystem, *Ecological Indicators*, 2016, Vol. 60, pp. 870–878.

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2025-123-100-115



Cite this article as:

Tesfay T., Mohamed E.S., Mehrteab M., Ghebretnsae T.W., Sereke T.E., Soil organic carbon losses following conversion of natural forests into agriculture: Insights from Eritrea, Dokuchaev Soil Bulletin, 2025, V. 123, pp. 100-115, DOI: 10.19047/0136-1694-2025-123-100-115

Ссылки для цитирования:

Tesfay T., Mohamed E.S., Mehrteab M., Ghebretnsae T.W., Sereke T.E. Потери органического углерода из почвы в результате перевода естественных лесов в сельскохозяйственные земли: Опыт Эритреи // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2025. Вып. 123. С. 100-115. DOI: 10.19047/0136-1694-2025-123-100-115

Acknowledgments:

The authors would like to thank the Ministry of Agriculture (MoA) of Eritrea, National Agricultural Research Institute (NARI), Hamelmalo Agricultural College (HAC) for their support in soil lab analyses and providing additional information.

Soil organic carbon losses following conversion of natural forests into agriculture: Insights from Eritrea

© 2025 T. Tesfay^{1,2*}, E. S. Mohamed^{1,3}, M. Mehrteab²,
T. W. Ghebretnsae^{1,2}, T. E. Sereke^{4,5}

¹*Department of Environmental Management,
Institute of Environmental Engineering,
Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba,
6 Miklukho-Maklaya Str., Moscow 117198, Russian Federation,
^{*}<https://orcid.org/0000-0002-0771-5522>,
e-mail: tumuzghitesfay7@gmail.com.*

²*Department of Land Resources and Environment,
Hamelmalo Agricultural College, Keren, Eritrea.*

³*National Authority for Remote Sensing and Space Sciences,
Cairo 1564, Egypt.*

⁴*Department of Geography,
Moscow State University of Geodesy and Cartography,
4 Gorokhovskiy Str., Moscow 105064, Russian Federation.*

⁵*Department of Geography, College of Business and Social Sciences,
Adi Keih, Eritrea.*

Received 02.09.2024, Revised 23.10.2024, Accepted 03.06.2025

Abstract: Conversion of natural forests into conventional agricultural lands may lead to significant soil organic carbon losses. Soil organic carbon stock assessment for such land use changes is very crucial for appropriate land use management, soil fertility improvement, ecosystem restoration and climate-change mitigation measures. However, information on the status of soil organic carbon stocks for such land use types is limited in Eritrea and in the Horn of Africa. Thus, the study aimed to assess soil organic carbon stocks for natural forests, continuous cropping, shifting cultivation, and grazing land use types. Fifty-one surface soil samples were collected from these four types of land use around Adi Hakin, Laelay Gash, Eritrea, and analysed. One-way analysis of variance (ANOVA) test results showed that land use changes had highly significant effect on soil organic carbon stock ($p < 0.001$). The natural forest and continuous cropping land use types recorded the highest ($51.69 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$) and lowest ($21.23 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$) mean soil organic carbon stocks, respectively. Grazing and shifting cultivation had 22.74 and $23.57 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$ soil organic carbon stocks, respectively. Conversion of natural forest into continuous cropping, grazing, and shifting cultivation in the study area in the long run resulted in losing 58.93, 56.00 and 54.40% of soil organic carbon stocks, and emitting 111.79, 106.25 and 103.20 $\text{Mg} \cdot \text{CO}_2 \cdot \text{ha}^{-1}$, respectively, to the atmosphere. Thus, the study concludes that conventional agriculture contributes to the atmospheric CO_2 concentration through soil carbon emission. On the contrary, conservation of natural forests is crucial for soil carbon sequestration and atmospheric CO_2 mitigation endeavors.

Keywords: land uses; soil organic carbon; natural forest; shifting cultivation; grazing.

Потери органического углерода из почвы в результате перевода естественных лесов в сельскохозяйственные земли: Опыт Эритреи

Резюме: Преобразование естественных лесов в сельскохозяйственные угодья может привести к значительным потерям органического углерода в почве. Оценка запасов почвенного органического углерода при таких изменениях в землепользовании важна для рационального использования

земель, повышения плодородия почв, восстановления экосистем и разработки мер по смягчению последствий изменения климата. Однако информация о состоянии запасов почвенного органического углерода при таких видах землепользования в Эритрее и в регионе в целом весьма ограничена. Таким образом, целью исследования была оценка запасов почвенного органического углерода в естественных лесах, при непрерывном и переложном земледелии и на пастбищах. Пятьдесят один образец из верхнего слоя почвы был отобран из четырех вариантов землепользования в окрестностях Ади Хакин, Лазлай Гаш, Эритрея, и проанализирован. Результаты однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA) показали, что изменения в землепользовании сильно влияют на запасы почвенного органического углерода ($p < 0.001$). В почвах под естественным лесом и при непрерывном земледелии зарегистрированы максимальные ($51.69 \text{ Мг} \cdot \text{га}^{-1}$) и минимальные ($21.23 \text{ Мг} \cdot \text{га}^{-1}$) значения средних запасов почвенного органического углерода соответственно. На пастбищах и при переложном земледелии запасы почвенного органического углерода составили 22.74 и $23.57 \text{ Мг} \cdot \text{га}^{-1}$ соответственно. Преобразование естественных лесов в участки непрерывного земледелия, в пастбища и в уголья переложного земледелия на исследуемой территории с течением времени привело к потере 59, 56 и 54% запасов почвенного органического углерода и выбросу в атмосферу 112, 106 и $103 \text{ Мг CO}_2 \cdot \text{га}^{-1}$ соответственно. При традиционном сельском хозяйстве в атмосферу выбрасывается больше углерода, чем при остальных видах землепользования. Напротив, сохранение естественных лесов имеет решающее значение для секвестрации углерода и борьбы с выбросами CO_2 в атмосферу.

Ключевые слова: землепользование; почвенный органический углерод; естественный лес; переложное земледелие; выпас скота.

INTRODUCTION

Natural forest ecosystems are determinants of environmental sustainability (Ibrahim et al., 2022). Globally, forest soils store more than 40% of the total organic carbon (C) in the terrestrial ecosystems (IPCC, 2007; Wei et al., 2014). However, forests are threatened by conversion for agricultural purposes, especially in less-developed regions (Ibrahim et al., 2022). For example, in Africa, agricultural expansion is solely responsible for 70–80% of forest loss (Olorunfemi et al., 2021). Conversion of natural forests into agriculture and grazing lands reduces SOC stocks and consecutively increases atmospheric CO_2 concentrations (Pringle et al., 2014; Schulz et al., 2016; Tolimir et al.,

2020), and such emissions were reported by Don et al., (2011) as 25–30% of the total global greenhouse gas emissions. A review by Wei et al., (2014) shows that the SOC stock reductions due to conversion of forests into agricultural lands in temperate, tropical and boreal regions amounted to 52, 41 and 31%, respectively. Studies reveal significantly lower SOC stocks in continuous cropping, grazing, shifting cultivation, and managed plantation lands compared to lands covered by natural forests (Chen et al., 2016; Choudhary et al., 2016; Nuguse et al., 2019; Beillouin et al., 2023). Thus, it is high time for agricultural intensification to increase land productivity instead of agricultural expansions (Adolph et al., 2023).

Likewise, in Eritrea, rapid population growth, along with very low agricultural productivity, has led to the rapid expansion of agricultural lands (Berhe, 2018), and vast areas of natural forests have been converted into agricultural and grazing lands since the 1970s. Ghebregabher et al. (2016) reported an annual forest cover loss of 62 km² from 1972 to 2014. Measho et al. (2019) also revealed that 57.1% of the country was in a significantly decreasing annual normalised difference vegetation index (NDVI) trend from 2000 to 2017. Land degradation is widespread in the country (Tesfay et al., 2020) due to non-sustainable agriculture, overgrazing, overexploitation of forests, urbanisation and resettlement, and some natural causes (Berhe, 2018).

Conventional cropping and grazing are the dominant land use types in Eritrea. Agriculture employs more than 75% of the population (Tesfay et al., 2024) though the crop productivity is very low – below 0.7 t·ha⁻¹ (Tesfay et al., 2018). Food is provided by subsistence farming and grown under erratic rainfall and recurrent drought spells. Albeit the efforts of the government to stop agricultural land expansions and increase productivity per unit of land, the agricultural sector could not be promoted, and agricultural expansion, though reduced, is still continuing. For example shifting cultivation is still practiced to some extent in some parts of the country, especially in the southwestern parts. Livestock rearing is very common by sedentary farmers/agropastoralists, and pastoralists. Grazing practices are traditional and uncontrolled where, in most cases, livestock freely and continuously overgraze communal lands (Tesfay et al., 2024). As Eritrea is found in the Sahel region, vegetation is scarce, especially in

the dry seasons, for about 9 months. Nomadic livestock herders always migrate from place to place in search of grass and water for their animals.

Therefore, the impact of forestland conversion, land degradation, deforestation, unmanaged agricultural lands, and uncontrolled grazing practices on SOC loss is obvious. However, systematic study on the status and losses of SOC stocks in such converted different land use types is absent in Eritrea and in the Horn of Africa.

Thus, the study aimed to assess SOC stock in continuous cropping, grazing and shifting cultivation lands as compared to natural forest lands in Adi Hakin, Laelay Gash, Eritrea. Assessing the effects of such land use conversions on the SOC stock is crucial for informed policy decisions in case of soil fertility improvement, ecosystem restoration and climate-change mitigation plans. So that the study is supposed to be a useful asset for researchers, land use planners, and decision-makers for identifying and devising appropriate strategies for natural forest conservation, soil C management in agricultural and grazing lands, and climate change mitigation actions.

MATERIALS AND METHODS

Study Area

The study was carried out in Adi Hakin, Laelay Gash, Eritrea, which is located in the southwestern part of the country within the moist lowlands agroecological zone. The study area extends from 14°36'00'' to 14°48'36'' N and 37°34'12 to 37°41'24'' E, which covers around 25,000 ha of land with an average altitude of 1070 m above mean sea level. The average monthly temperature, annual rainfall and evapotranspiration rate are 25.8 °C, 599.04 mm and 1953.96 mm·yr⁻¹, respectively. Laelay Gash subzone is known for its extensive rain-fed cropping and pastoralism. The major rain-fed crops are sorghum, millets, maize, beans and sesame. Farmers also rear cattle, goats, sheep, camels and donkeys. The area is home to different acacia species, *Adansonia digitata*, *Ziziphus spina-Christi*, *Balanites aegyptiaca*, *Tamarindus indica*, etc. Patches of acacia forests, and riverine forests (mainly *Hyphaene thebaica*) are also common. It is also home to a variety of wildlife animals like elephants, baboons, vervet

monkeys, antelopes, dorcas gazelles, warthogs, hyenas, foxes, bushbucks, honey badgers, and a wide range of birds and reptiles (Naty, 2002). The area has been transformed from forest-dominated in the 1970s to farming-dominated in the current time. According to Berhe (2018), the area was mostly classified as the declining land productivity category where the agricultural and agro-pastoral lands prevailed. Measho et al. (2019) also reported a hot spot decreasing annual NDVI trend from 2000 to 2017 in that area.

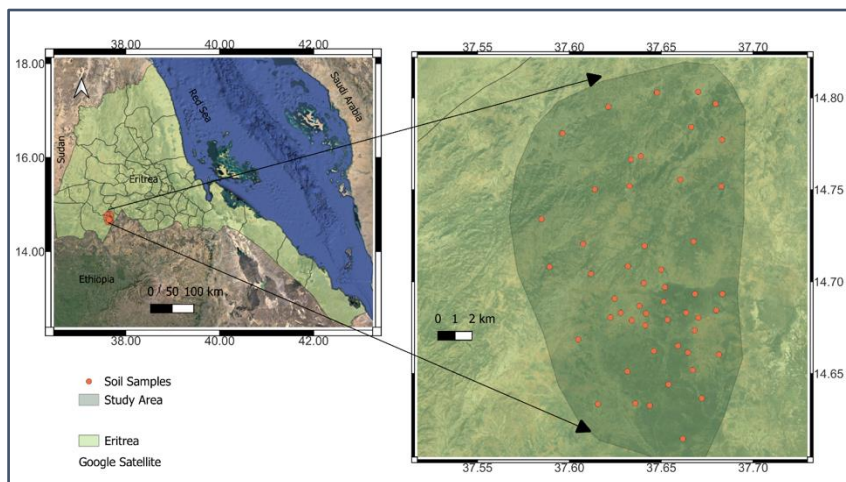


Fig. 1. Study area and soil samples location map.

Soil sampling and analysis

First systematic reconnaissance surveys were conducted on the whole study area in August 2023, and accordingly, four land use types were chosen namely natural forest, continuous and shifting cultivation, and grazing. These land use types were chosen to compare their SOC stocks and other soil properties, bearing in mind the fact that grazing, continuous and shifting cultivation lands were previously forestlands but converted due to agricultural expansion in the 1970s. Fifty-one georeferenced composite surface (0–30 cm) soil samples were collected from natural forest, continuous cropping, grazing,

shifting cultivation lands in September 2023 using stratified sampling technique. Samples were taken considering the four land use types, their adjacent coexistences, and homogeneity of soil samples. Two of the authors (one being native to the area) have made enough care to minimize variability of soil samples when collecting. The soils are lixisols at the global scale.

To make one composite soil sample, 5 individual samples were taken using 30 cm deep auger within a radius of 10 m, well mixed, and around 1.5 kg of soil was packed in a plastic container, labelled, and GPS coordinates were recorded at the centre. Thus, for the total 51 composite soil samples, 255 individual soil samples were collected. Moreover, for bulk density determination, 51 undisturbed soil samples were also collected using core sampler. The soil samples were dried, grounded, sieved, and analysed following standard procedures in the soil laboratory of national agricultural research institute (NARI), Eritrea. Soil properties were analysed using respective methods: particle size distribution (hydrometer), soil textural classes (textural triangle), gravel (sieve and weigh), bulk density (core sampler), pH (pH meter), electrical conductivity (EC meter), and SOC (Walkley-Black) (FAO, 2019). The soil data were analysed using one-way ANOVA in the SPSS package to see the effects of land uses on the measured soil properties.

Carbon loss and CO₂ emission

Calculating the C content that could be lost with CO₂ emission to the atmosphere due to the conversion of natural forests into continuous cropping, shifting cultivation, and grazing lands is crucial for informed-policy decisions for natural forest conservation, soil fertility management, ecosystem restoration and climate change mitigation. Here, calculations are made based on the mean SOC stocks, obtained in the continuous cropping, shifting cultivation, and grazing lands compared to that of the natural forests.

First, SOC stock (SOCs) was computed using equation 1, adopted after Tan and Lal (2004b):

$$\text{SOCs} = \text{SOC} \cdot \text{BD} \cdot \text{D} \cdot (1 - F/100), \quad (1)$$

where SOC_s is soil organic carbon stock ($\text{Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$) in the 30 cm soil layer, SOC is soil organic carbon in %, BD is dry soil bulk density in $\text{Mg} \cdot \text{m}^{-3}$, D is sampled soil layer thickness in cm, and CF is > 2 mm coarse fraction in %.

Then, the respective C content that is lost due to conversion of natural forests into continuous cropping, shifting cultivation and grazing lands was calculated using equation 2:

$$C_i = (\text{SOC}_{s_i} - \text{SOC}_{s_f})A_i, \quad (2)$$

where C_i is the C that is lost from the i^{th} land use type, SOC_{s_i} is the mean SOC stock in the i^{th} land use type, SOC_{s_f} is the mean SOC stock in natural forest soils, all in $\text{Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$, and A_i is the area, in ha, that was converted from natural forest to the i^{th} land use type. Computation is done per unit – ha. If the result is negative, then it indicates C loss.

Finally, the emitted CO_2 (EC) from each land use was calculated using equation 3. The factor 3.67 is computed by dividing the molecular weight of CO_2 by the atomic weight of C considering the C isotopes, adopted after IPCC (2007) fourth report.

$$\text{EC}_i = C_i \cdot 3.67, \quad (3)$$

where EC_i is the emitted CO_2 from the i^{th} land use type to the atmosphere, and C_i is the C that is lost from the i^{th} land use type.

RESULTS AND DISCUSSION

Effects of land use types on SOC stock and other soil properties

Sandy loam and loam soils are dominant in the study area. The mean SOC stocks ($\text{Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$) in the continuous cropping, grazing, shifting cultivation lands, and natural forests were 21.23, 22.74, 23.57 and 51.69, respectively (Table 1). Land use type showed very high effect ($p < 0.001$) on SOC stock, soil organic matter (SOM), pH and gravel content; and high effect ($p < 0.005$) on clay and sand contents; and significant effect ($p < 0.05$) on bulk density and electrical conductivity, but not significantly affects silt content (Table 1). Many research findings also reported that land use types have great impact on SOC stock and other soil properties (Ciric et al., 2013; Choudhary et al., 2016; Chen et al., 2016; Nuguse et al., 2019; Ngatia et al., 2021;

Beillouin et al., 2023; Ghimire et al., 2023; Weldewahid et al., 2023; Lebedeva et al., 2024; Tesfay et al., 2024).

Table 1. Effect of land uses on some measured soil properties (mean values)

Soil Parameter	Continuous cultivation	Shifting cultivation	Grazing	Natural forest	p value
SOCs, Mg·ha ⁻¹	21.23	23.57	22.74	51.69	< 0.001
SOM, %	1.05	1.20	1.44	2.54	< 0.001
BD, Mg·m ⁻³	1.31	1.28	1.25	1.24	0.04
pH (1 : 5)	8.36	7.74	8.22	8.25	< 0.001
EC (1 : 5), dS·m ⁻¹	0.07	0.07	0.05	0.08	0.044
Clay, %	26.62	36.36	13.85	27.75	0.003
Silt, %	27.79	27.50	31.35	33.00	0.471
Sand, %	45.59	37.05	54.81	39.25	0.004
Gravel, %	8.46	11.83	26.42	4.85	< 0.001

The mean SOC stocks in the mentioned above land use types were ordered in their magnitud: natural forest land > shifting cultivation > grazing > continuous cropping lands. Other researchers also found higher SOC stocks in natural forest lands and lower in continuous cropping, grazing, shifting cultivation, and managed plantations lands (Ciric et al., 2013; Choudhary et al., 2016; Chen et al., 2016; Nuguse et al., 2019; Beillouin et al., 2023). Conversion of natural forests into continuous cropping, grazing, and shifting cultivation lands in the study area through time caused SOC stock reductions by 58.93, 56.00 and 54.40%, respectively. These SOC stock losses are higher than the ones reported by Nuguse et al. (2019), where the SOC losses in grazing and continuous cropping lands were 43.24 and 37.84%, respectively, in the central parts of Eritrea; by Wei et al. (2014) the SOC stock reductions due to conversion of forest lands into agricultural in the tropical regions were 41%; and by Choudhary et al.

(2016) SOC in the managed plantation and shifting cultivation lands were by 51.68 and 48.55% less, than in the natural forests, respectively.

Natural forests are characterized by the highest mean SOC stock, and lowest bulk density, sand and gravel contents. On the contrary, continuous cropping lands had the lowest mean SOC stock, and highest bulk density. Natural forests contribute to C sequestration due to reduced soil erosion, continuous litter fall, root exudates, and minimal disturbances. Therefore, protecting natural forests from land conversion and deforestation is of greatest importance for C sequestration, soil fertility and quality improvement, ecosystem resilience and climate-change mitigation (Ivanov et al., 2021).

Conversion of natural forests into continuous conventional cropping lands in the study area over time leads to significantly reduced and poor SOC stock. This is due to conventional tillage practices, continuous cultivation without fallow periods, monocropping, heavy crop residue harvest, heavy post-harvest grazing, no addition of organic matter, and water and wind erosion as the soil stay bare during the dry seasons. Other findings in the region also reported low organic matter in conventional rainfed cropping fields due to the aforementioned problems (Nuguse et al., 2019; Tesfay et al., 2020; Weldewahid et al., 2023; Tesfay et al., 2024). These all imply that conversion of forests into agricultural land depletes the natural organic matter reserve of the soils if appropriate land management practices do not take place to improve SOM storage and soil fertility. SOM and soil fertility can be improved through conservation practices like no/minimal tillage, cover cropping, crop residue retention, application of farmyard manure, irrigation, organic amendments, and integrated and diverse cropping/farming systems. Moreover, by introducing trees and incorporating exogenous C in the form of biochar or organic amendments, and reforesting back croplands to its natural vegetation by promoting agricultural production per unit area. Therefore, agricultural intensification, that promote increased productivity, should be planned and implemented carefully to protect agricultural expansion and conserve natural forests.

Conversion of natural forests into grazing lands over time leads to remarkably reduced SOC stocks in the study area. This is attributed to the uncontrolled traditional grazing practices which is characterized

by continuous heavy livestock keeping. This results in vegetation clearance, soil erosion by water and wind, and land degradation. Other researchers also reported very poor SOC, soil fertility and other nutrients, degraded vegetation, enhanced soil erosion and runoff in grazing lands due to overgrazing (Mussa et al., 2017; Nuguse et al., 2019; Mosier et al., 2022; Kim et al., 2023; Tesfay et al., 2024). SOC and soil health of grazing lands can be improved through rotational grazing, applying right stocking rate, long rest periods for pastures, establishing enclosures and promoting cut and carry schemes, reseeding with legumes, and developing and using models for grazing rate management and SOC dynamics monitoring (Pringle et al., 2014; Ritchie, 2020).

Conversion of natural forests into shifting cultivation lands in the study area over time leads to significant reduction in SOC stocks; which is in line with other works (Chatterjee et al., 2022; Baul et al., 2023; Abrell et al., 2024). This is due to clearing and burning vegetation, conventional tillage practices, crop residue off-take, no addition of organic matter, heavy post-harvest grazing, reduction of fallow periods, water and wind erosion. Fallow periods were meant to give time for natural regeneration and C accumulation but fallowing time is shortened due to land shortages and poor agricultural productivity. In the area shifting cultivation is in transition; fallow periods are reduced, and in some cases fallow periods are cancelled. SOC and soil fertility in slash-and-burn shifting cultivation can be improved through proper management of cultivation and fallow periods, minimum tillage, zero burning, promoting legume crops, motivating farmers to invest in improved fallows, promoting agroforestry practices, and developing and using integrated farming systems models.

Carbon loss and CO₂ emission

Comparing the mean SOC stocks in natural forests and continuous cropping lands, the difference was found to be 30.46 Mg·ha⁻¹. This implies that conversion of natural forests into continuous cropping lands in the study area over time contributes to a loss of 30.46 Mg C · ha⁻¹ and an emission of 111.79 Mg CO₂·ha⁻¹ to the atmosphere.

Similarly, conversion of forests into shifting cultivation and grazing lands in the long run causes losses of 28.11 and 28.95 Mg C·ha⁻¹ and emissions of 103.16 and 106.25 Mg CO₂·ha⁻¹ to the atmosphere, respectively. This shows that improved management practices in the continuous cropping, shifting cultivation, and grazing lands are unattended. Thus, good land management practices need to be exercised, and more importantly, conservation of natural forests needs critical attention as they are very crucial for the well-being of our planet.

CONCLUSIONS

Land use types showed very high effect ($p < 0.001$) on SOC stock, soil organic matter, pH and gravel content and high effect ($p < 0.005$) on clay and sand contents, significant effect ($p < 0.05$) on bulk density and electrical conductivity.

Conversion of natural forests into continuous cropping, grazing, and shifting cultivation lands in the study area over time contributes to losses of 30.46, 28.95 and 28.11 Mg C·ha⁻¹ and emissions of 111.79, 106.25 and 103.16 Mg CO₂·ha⁻¹ to the atmosphere, respectively. Thus, the study concludes that conventional farming systems are potential contributors to the atmospheric CO₂ through SOC losses. On the contrary, natural forest soils have high potential to mitigate climate-change through SOC sequestration.

REFERENCES

1. Abrell T., Naudin K., Bianchi F., Aragao D.V., Tittonell P., Corbeelset M., Shifting cultivation in decline: An analysis of soil fertility and weed pressure in intensified cropping systems in Eastern Amazon, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2024, 360, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108793>.
2. Adolph B., Jellason N.P., Kwenye J.M., Davies J., Dray A.G., Waeber P.O., Jeary K., Franks P., Exploring Farmers' Decisions on Agricultural Intensification and Cropland Expansion in Ethiopia, Ghana, and Zambia through Serious Gaming, *Land*, 2023, Vol. 12, 556, DOI: <https://doi.org/10.3390/land12030556>.
3. Baul T.K., Chowdhury A.I., Uddin J., Hasan M.K., Kilpeläinen A., Nandi R., Karmakar S., Akhter J., Effects of fragmentation and shifting cultivation on soil carbon and nutrients: A case study in Sitapahar forest, Bangladesh,

Rhizosphere, 2023, 27, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2023.100756>.

4. Beillouin D., Corbeels M., Demenois J., Berre D., Boyer A., Fallot A., Feder F., Cardinael R., A global meta-analysis of soil organic carbon in the Anthropocene, *Nature Communications*, 2023, 14, 3700, DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-023-39338-z>.

5. Berhe S.M., *Final Country Report of the Land Degradation Neutrality Target Setting Programme in Eritrea*, The State of Eritrea, UNCCD National Focal Point, LDN National Working Group and Ministry of Agriculture, Asmara: 2018, 20 p.

6. Chatterjee D., Kuotsu R., Ray S.K., Patra M.K., Thirugnanavel A., Kumar R., ... Deka B.C., Preventing soil degradation in shifting cultivation using integrated farming system models, *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2022, Vol. 68(13), pp. 1841–1857, DOI: <https://doi.org/10.1080/03650340.2021.1937139>.

7. Chen C.P., Juang K.W., Cheng C.H., Pai C.W., Effects of adjacent land-use types on the distribution of soil organic carbon stocks in the montane area of central Taiwan. *Botanical Studies*, 2016, Vol. 57(1), 32, DOI: <https://doi.org/10.1186/s40529-016-0147-5>.

8. Choudhary B.K., Majumdar K., Datta B.K., Effects of land use on the Soil Organic Carbon storage potentiality and soil edaphic factors in Tripura, Northeast India, *American Journal of Climate Change*, 2016, Vol. 5(3), DOI: <http://dx.doi.org/10.4236/ajcc.2016.53031>.

9. Ciric V., Manojlovic M., Nesic L., Belic M., Soil organic carbon loss following land use change in a semiarid environment, *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 2013, Vol. 19(3), pp. 461–466, URL: <https://agrojournal.org/19/03-11.pdf>.

10. Don A., Schumacher J., Freibauer A., Impact of tropical land-use change on soil organic carbon stocks – a meta-analysis, *Global Change Biology*, 2011, Vol 17(4), pp. 1658–1670, DOI: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02336.x>.

11. FAO. Standard operating procedure for soil organic carbon Walkley-Black method (Titration and colorimetric method). Global Soil Laboratory Network GLOSOLAN, 2019, URL: <https://www.fao.org/3/ca7471en/ca7471en.pdf>.

12. Ghebregabher M.G., Yang T., Yang X., Wang X., Khan M., Extracting and analysing forest and woodland cover change in Eritrea based on landsat data using supervised classification, *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, 2016, Vol. 19, pp. 37–47, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejrs.2015.09.002>.

13. Ghimire P., Lamichhane U., Bolakhe S., Lee C.H.J., Impact of land use types on soil organic carbon and nitrogen stocks: A study from the Lal Bakaiya watershed in Central Nepal, *Hindawi International Journal of*

Forestry Research, 2023, DOI: <https://doi.org/10.1155/2023/9356474>.

14. Ibrahim F.M., Osikabor B., Olatunji B.T., Ogunwale G.O., Understanding forest land conversion for agriculture in a developing country context: An application of the theory of planned behaviour among a cohort of Nigerian farmers, *Folia Forestalia Polonica*, 2022, Vol. 64(3), pp. 117–130, DOI: <http://dx.doi.org/10.2478/ffp-2022-0012>.

15. IPCC-Climate Change. The Physical Science Basis. Contribution of Working group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

16. IPCC. Fourth Assessment Report. Climate Change Synthesis Report. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

17. Ivanov A.L., Savin I.Yu., Stolbovoy V.S., Dukhanin Yu.A., Kozlov D.N., Methodological approaches to the formation of a unified national system of monitoring and accounting of carbon balance and greenhouse gas emissions on lands of the agricultural fund of the Russian Federation, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2021, Vol. 108, pp. 175–218, DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2021-108-175-218>

18. Kim J., Ale S., Kreuter U.P., Teague W.R., DelGrosso S.J., Dowhower S.L., Evaluating the impacts of alternative grazing management practices on soil carbon sequestration and soil health indicators, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2023, 342, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2022.108234>.

19. Lebedeva T.N., Sokolov D.A., Semenov M.V., Zinyakova N.B., Udaltsov S.N., Semenov V.M., Distribution of organic carbon between structural and process pools in gray forest soil of different land use, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2024, Vol. 118, pp. 79–127, DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2024-118-79-127>.

20. Measho S., Chen B., Trisurat Y., Pellikka P., Guo L., Arunyawat S., Tuankruea V., Ogbazghi W., Yemane T., Spatio-Temporal Analysis of Vegetation Dynamics as a Response to Climate Variability and Drought Patterns in the Semiarid Region, Eritrea, *Remote Sensing*, 2019, 11, DOI: <https://doi.org/10.3390/rs11060724>.

21. Mosier S., Apfelbaum S., Byck P., Ippolito J., Cotrufo M.F., Improvements in soil properties under adaptive multipaddock grazing relative to conventional grazing, *Agronomy Journal*, 2022, Vol. 114, pp. 2584–2597, DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/agj2.21135>.

22. Mussa M., Ebro A., Nigatu A., Soil organic carbon and total nitrogen stock response to traditional enclosure management in eastern Ethiopia, *Journal of Soil Science and Environmental Management*, 2017, Vol. 8(2), pp. 37–43, DOI: <https://doi.org/10.5897/JSSEM2015.0545>.

23. Naty A., Environment, Society and the State in Western Eritrea, *Africa*,

2002, Vol. 72(4), DOI: <https://doi.org/10.3366/afr.2002.72.4.569>.

24. Ngatia L.W., Moriasi D., Grace J.M., Fu R., Gardner C.S., Taylor R.W., Land Use Change Affects Soil Organic Carbon: An Indicator of Soil Health, *IntechOpen. Environmental Health*, 2021, DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.95764>.

25. Nuguse M.T., Singh B., Ogbazghi W., Studies on soil organic carbon and some physico-chemical properties as affected by different land uses in Eritrea, *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, Vol. 18(3), pp. 213–222, DOI: <https://doi.org/10.5958/2455-7145.2019.00030.4>.

26. Olorunfemi I.E., Olufayo A.A., Fasinmirin J.T., Komolafe A.A., Dynamics of land use land cover and its impact on carbon stocks in Sub-Saharan Africa: an overview, *Environment, Development and Sustainability*, 2022, Vol. 24, pp. 40–76, DOI: <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01484-z>.

27. Pringle M.J., Allen D.E., Phelps D.G., Bray S.G., Orton T.G., Dalal R.C., The effect of pasture utilization rate on stocks of soil organic carbon and total nitrogen in a semi-arid tropical grassland, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2014, Vol. 195, pp. 83–90, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.05.013>.

28. Ritchie M.E., Grazing Management, Forage Production and Soil Carbon Dynamics, *Resources*, 2020, 9, DOI: <https://doi.org/10.3390/RESOURCES9040049>.

29. Schulz K., Voigt K., Beusch C., Almeida-Cortez J.S., Kowarik I., Walz A., Cierjacks A., Grazing deteriorates the soil carbon stocks of Caatinga forest ecosystems in Brazil, *Forest Ecology Management*, 2016, Vol. 367, pp. 62–70, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.02.011>.

30. Tan Z.X., Lal R., Smeck N.E., Calhoun F.G., Slater B.K., Parkinson B., Gehring B., Taxonomic and geographic distribution of soil organic carbon pools in Ohio, In: *Soil Science Society of America Journal*, 2004b, Vol. 68, pp. 1896–1904.

31. Tesfay T., Mohamed E.S., Ghebretnsae T.W., Ghebremariam S.B., Mehrteab M., Soil organic carbon stock assessment for soil fertility improvement, ecosystem restoration and climate-change mitigation, *E3S Web of Conferences* 555, 2024, DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202455501015>.

32. Tesfay T., Ogbazghi W., Singh B., Effects of soil and water conservation interventions on some physico-chemical properties of soil in Hamelmalo and Serejeka Sub-zones of Eritrea, *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, Vol. 19(3), pp. 229–234, DOI: <http://doi.org/10.5958/2455-7145.2020.00031.4>.

33. Tesfay T., Ogbazghi W., Singh B., Tsegai T., Factors Influencing Soil and Water Conservation Adoption in Bashari, Gheshnashm and Shmangus,

Eritrea, *IRA International Journal of Applied Sciences*, 2018, Vol. 12(2), pp. 7–14, DOI: <http://dx.doi.org/10.21013/jas.v12.n2.p1>.

34. Tolimir M., Kresović B., Životić L., Dragović S., Dragović R., Sredojević Z., Gajić B., The conversion of forestland into agricultural land without appropriate measures to conserve SOM leads to the degradation of physical and rheological soil properties, *Scientific Reports*, 2020, Vol. 10(1), 13668, DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-70464-6>.

35. Wei X., Shao M., Gale W., Li L., Global pattern of soil carbon losses due to the conversion of forests to agricultural land, *Scientific Reports*, 2014, Vol. 4(1), 4062, DOI: <http://dx.doi.org/10.1038/srep04062>.

36. Weldewahid Y., Habtu S., Taye G., Teka K., Gessesse T.A., Effects of long-term irrigation practice on soil quality, organic carbon and total nitrogen stocks in the drylands of Ethiopia, *Journal of Arid Environments*, 2023, 214, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2023.104982>.

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2025-123-116-147



Ссылки для цитирования:

Артемяева З.С., Колягин Ю.Г., Варламов Е.Б., Засухина Е.С., Цомаева Е.В., Ярославцева Н.В., Когут Б.М. Химическая структура органического вещества водоустойчивых микроагрегатов агрочерноземов разных позиций на склоне // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2025. Вып. 123. С. 116-147. DOI: 10.19047/0136-1694-2025-123-116-147

Cite this article as:

Artemyeva Z.S., Kolyagin Yu.G., Varlamov E.B., Zasukhina E.S., Tsomaeva E.V., Yaroslavtseva N.V., Kogut B.M., Chemical structure of organic matter of water-stable microaggregates of agrochernozems of different positions on the slope, Dokuchaev Soil Bulletin, 2025, V. 123, pp. 116-147, DOI: 10.19047/0136-1694-2025-123-116-147

Благодарность:

Исследования проведены в рамках Госзадания FGUR–2022–0012 с привлечением оборудования Центра коллективного пользования “Функции и свойства почв и почвенного покрова” Почвенного института им. В.В. Докучаева.

Acknowledgments:

The research was carried out within the framework of the State Assignment FGUR–2022–0012 with the involvement of equipment from the Center for Collective Use “Functions and Properties of Soils and Soil Cover” of the V.V. Dokuchaev Soil Science Institute.

Химическая структура органического вещества водоустойчивых микроагрегатов агрочерноземов разных позиций на склоне

© 2025 г. З. С. Артемяева^{1*}, Ю. Г. Колягин^{2**},
Е. Б. Варламов^{1***}, Е. С. Засухина^{3****}, Е. В. Цомаева^{1*****},
Н. В. Ярославцева^{1*****}, Б. М. Когут^{1*****}

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

*<https://orcid.org/0000-0001-9781-9351>, e-mail: artemyevazs@mail.ru,

***<https://orcid.org/0000-0003-0345-9186>,

*****<https://orcid.org/0000-0001-8934-8705>,

***** <https://orcid.org/0000-0002-5805-4285>,
***** <https://orcid.org/0000-0002-0565-2812>.

²МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия,
119991, Москва, Ленинские горы, 1,
** <https://orcid.org/0000-0001-8095-6923>.

³ФИЦ “Информатика и управление” РАН, Россия,
119333, Москва, ул. Вавилова, 44, корп. 2,
**** <https://orcid.org/0000-0001-5101-8751>.

*Поступила в редакцию 30.07.2024, после доработки 21.10.2024,
принята к публикации 03.06.2025*

Резюме: Методом твердотельной ¹³С-ЯМР-спектроскопии изучена химическая структура пулов органического вещества водоустойчивых свободных микроагрегатов, выделенных из воздушно-сухих агрегатов (2–1 мм) пахотных горизонтов полнопрофильного, эродированного и намытого агрочерноземов. Дана оценка изменения их химической структуры в денудационно-аккумулятивном ландшафте. Выявлено, что подавляющая часть водоустойчивых свободных микроагрегатов в эрозионной зоне – фрагменты/осколки разрушенных (преимущественно), а также новообразованных макроагрегатов за счет динамического замещения органического вещества *in situ*, о чем явно свидетельствуют интегральные показатели химической структуры всех пулов органического вещества свободных микроагрегатов эродированного агрочернозема, по сравнению с таковыми полнопрофильного варианта: пониженные индексы разложенности (DI), ароматичности (ARI) и гидрофобности (HI). Аналитические данные свидетельствуют в пользу преобладающей транспортировки из эрозионной зоны микроагрегатов, представленных фрагментами разрушенных (преимущественно) и новообразованных макроагрегатов. Во время транспортной фазы ранее физически защищенное агрегированное органическое вещество свободных микроагрегатов подвергается частичной деградации. Минерализуется преимущественно наиболее лабильная его часть (гидролизуемая), а его стабильная часть остается мало-/неизменной. Минерально-ассоциированное органическое вещество (ил и остаток) мало или совсем не трансформируется.

Ключевые слова: эрозия; водоустойчивые свободные микроагрегаты; химическая структура органического вещества; CP-MAS ¹³С-ЯМР-спектроскопия.

Chemical structure of organic matter of water-stable microaggregates of agrochernozems of different positions on the slope

© 2025 Z. S. Artemyeva^{1*}, Yu. G. Kolyagin^{2**}, E. B. Varlamov^{1***},
E. S. Zasukhina^{3****}, E. V. Tsomaeva^{1*****},
N. V. Yaroslavtseva^{1*****}, B. M. Kogut^{1*****}

¹Federal Research Centre “V.V. Dokuchaev Soil Science Institute”,
7 Bld. 2 Pyzhevskiy per., Moscow 119017, Russian Federation,
*<https://orcid.org/0000-0001-9781-9351>, e-mail: artemyevazs@mail.ru,
***<https://orcid.org/0000-0003-0345-9186>,
****<https://orcid.org/0000-0001-8934-8705>,
*****<https://orcid.org/0000-0002-5805-4285>,
*****<https://orcid.org/0000-0002-0565-2812>.

²Lomonosov Moscow State University,
1 Leninskie Gori, Moscow 119234, Russian Federation,
**<https://orcid.org/0000-0001-8095-6923>.

³Federal Research Center “Computer Science and Control”
of the Russian Academy of Sciences,
2 Bld. 44 Vavilova Str., Moscow 119333, Russian Federation,
****<https://orcid.org/0000-0001-5101-8751>.

Received 30.07.2024, Revised 21.10.2024, Accepted 03.06.2025

Abstract: The chemical structure of organic matter (OM) pools within water-stable free microaggregates, isolated from air-dry aggregates (2–1 mm) in arable horizons of non-eroded, eroded and deposited agrochernozems has been studied by solid-state ¹³C-NMR spectroscopy. An assessment is made of the alteration of their chemical structure in the denudative-accumulative landscape. It was revealed that the overwhelming majority of water-stable free microaggregates in erosion zone are the fragments of destroyed macroaggregates, mainly newly formed due to the dynamic replacement of OM *in situ*. This is clearly evidenced by the integral indicators of the chemical structure of all OM pools in free microaggregates of eroded agrochernozem compared to those of the non-eroded one: reduced OM decomposition index (DI), OM aromaticity index (ARI) and OM hydrophobicity index (HI). Analytical data indicate the predominant transport from the erosion zone of microaggregates, represented by fragments of destroyed and mainly newly formed macroaggregates. During the transport phase, the previously physically protected occluded OM of free microaggregates undergoes partial mineralization. Predominantly its most labile part (hydrolysable) is

mineralized, and its stable part remains little/non-changed. Mineral-associated OM (Clay and Residue) changes little, maintaining relative freshness.

Keywords: erosion; water-stable free microaggregates; chemical structure of organic matter; CP-MAS ^{13}C -NMR spectroscopy.

ВВЕДЕНИЕ

Органическое вещество (ОВ) рассматривается как решающий фактор в предотвращении эрозии в силу его фундаментальной связи со структурой почвы, соответственно, уменьшение его количества выступает как один из основных предикторов этого негативного процесса (FAO, 2015). Почвенные агрегаты, являясь основными единицами структуры почвы, физически стабилизируют ОВ, что, в свою очередь, предотвращает потери органического углерода ($\text{C}_{\text{орг}}$), в том числе, в результате эрозии (Le Bissonnais, 1996). В процессе водной эрозии почв происходит активное разрушение агрегатов, поэтому сохранение стабильной агрегатной структуры при различных условиях увлажнения во многом определяет устойчивость почвы в целом на различных этапах ее деградации: отрыва, разрушения, транспортировки/перераспределения и осаждения отложений.

Роль почвенных агрегатов в защите $\text{C}_{\text{орг}}$ зависит от их размера. Считается, что ОВ в микроагрегатах сохраняется лучше по сравнению с таковым макроагрегатов (Tisdall, Oades, 1982; Beare et al., 1994; Gupta, Germida, 1988; Six et al., 2000). Представляется актуальным изучение влияния эрозионных процессов на качественный состав ОВ водоустойчивых свободных микроагрегатов. Наиболее релевантная информация может быть получена с помощью твердотельной ^{13}C -ЯМР-спектроскопии (Чуков и др., 2018).

Данное исследование является продолжением работы (Артемьева и др., 2024), которая была посвящена изучению качественного состава ОВ водоустойчивых макроагрегатов тех же образцов почв. Было показано, что в эрозионной зоне водоустойчивые макроагрегаты представлены преимущественно новообразованными в результате активного динамического замещения ОВ *in situ*, также как и большая часть поступающих макроагрегатов в зону аккумуляции (Артемьева и др., 2024).

Цель работы – исследовать химическую структуру органического вещества водоустойчивых микроагрегатов агрочерноземов разных позиций на склоне методом твердотельной ^{13}C -ЯМР-спектроскопии.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объект исследования – типичные черноземы (Классификация..., 1977), *Haplic Chernozem* – согласно международной классификации (WRB, 2022), многофакторного полевого опыта ВНИИ земледелия и защиты почв от эрозии (Курская область, Медвенский район, с. Панино) на водораздельном плато и склоне северной экспозиции крутизной до 3° в слое 0–25 см после уборки урожая сельскохозяйственных культур. Исследованные черноземы среднемощные, тяжелосуглинистые: содержание ила (< 1 мкм) – 23–25%, пыли (50–1 мкм) – 74–75%, песка (50–1 000 мкм) – 1–2% на массу почвы. Содержание $\text{C}_{\text{орг}}$ 2.5–3.4% на массу почвы, pH_{KCl} 5.8. Агрегатный состав исследованных почв подробно описан ранее (Артемьева и др., 2021).

На склоне выделяли следующие зоны: 1) отсутствия эрозии ($51^\circ 31' 74''$ N; $04^\circ 07' 27''$ E), 2) эрозионную ($51^\circ 32' 00''$ N; $04^\circ 07' 06''$ E), 3) преобладающей аккумуляции ($51^\circ 31' 81''$ N; $04^\circ 06' 00''$ E) (Ермолаев, 1992). Ранее установлено, что различные их сочетания приурочены к определенным формам рельефа (Травникова и др., 2010; Артемьева и др., 2023; Цомаева и др., 2023). Исследованы пахотные горизонты: полнопрофильного (вариант 1), эродированного (слабо-) (вариант 2), намытого (вариант 3) агрочерноземов. Вариант 1 на водораздельном плато в условиях зернопаропропашного севооборота (чистый пар – озимая пшеница – кукуруза – ячмень), в год отбора образцов участок был под чистым паром. Вариант 2 – на склоне северной экспозиции 3° в условиях зернотравяного севооборота (озимая пшеница – ячмень + травы – многолетние травы – многолетние травы), в год отбора образцов участок был под озимой пшеницей. Вариант 3 – внизу склона северной экспозиции в условиях зернотравяного севооборота (озимая пшеница – ячмень + травы – многолетние травы – многолетние травы), в год отбора образцов участок был под озимой пшеницей.

После сухого просеивания образцов были получены следующие фракции: > 10, 10–7, 7–5, 5–3, 3–2, 2–1, 1–0.5, 0.5–0.25, < 0.25 мм. Далее, согласно модификации Хана (1969) метода Саввинова, мокрому просеиванию были подвергнуты воздушно-сухие агрегаты размером 2–1 мм. Выбор агрегатов данного размера обусловлен их наибольшим вкладом в общий $C_{орг}$ почвы (Когут и др., 2019).

Для выделения разных пулов ОВ применяли модифицированный вариант гранулоденсиметрического фракционирования, полная схема которого представлена ранее (Artemyeva et al., 2021). С помощью бромформ-этанольной смеси выделяли свободное ОВ (ЛФ_{СВ} – легкие фракции (плотность <1.8 г/см³)). Далее для разрушения агрегатов использовали ультразвуковой диспергатор зондового типа ЛУЗД-0.5К-02-00000 ПС (Криамид, Россия). Озвучивание (71 Дж/мл) образца почвы (10 г + 50 мл деионизированной воды) осуществляли в течение 1 мин. с последующим центрифугированием. Процедуру повторяли 15 раз. После удаления илистых частиц с помощью бромформ-этанольной смеси выделяли агрегированное ОВ (ЛФ_{АГР} – легкие фракции (плотность <1.8 г/см³)). Повторность трехкратная.

Выделялись следующие пулы ОВ: неагрегированное, свободное (ЛФ_{СВ}), агрегированное (ЛФ_{АГР}), ОВ илистой фракции (ил) и ОВ фракции остатка. Содержание углерода (ТС) и азота (ТN) определяли методом каталитического сжигания на анализаторе TOC Analyzer (Shimadzu, Япония). Все измерения выполняли в трехкратной повторности.

Для получения спектров пулов ОВ все образцы, кроме ЛФ_{СВ}, обрабатывали 10%-ной HF для удаления соединений железа, ухудшающих качество спектра, и концентрирования ОВ. Количество обработок: ЛФ_{АГР} – 2, Ил – 3, Остаток – 4. Методика подробно описана ранее (Данченко и др., 2022; Артемьева и др., 2023).

Твердотельные CP-MAS ¹³C-ЯМР-спектры образцов регистрировали на спектрометре Bruker Avance-II 400 WB (США) на частоте 100.4 МГц с использованием 4 мм датчика. Подробное описание режима съемки представлено ранее (Данченко и др., 2022).

Выделяли области, соответствующие следующим химическим типам углерода: алкильный Alk-C (0–47 м. д.), О-алкильный O-Alk-C (47–113 м. д.), ароматический Ar-C (113–160 м. д.), карбоксильный и карбонильный (160–214 м. д.). Рассчитывали следующие показатели ОБ:

- величину отношения $\text{Alk}/\Sigma\text{O-Alk}$ – интегральный показатель разложенности/переработки ОБ (Baldock et al., 1992),
- индекс ароматичности ОБ (ARI) = $\Sigma\text{Ar}/\Sigma\text{Alk} + \text{O-Alk} + \Sigma\text{Ar}$ (Hatcher et al., 1981),
- индекс гидрофобности ОБ (HI) = $((\text{Alk} + \text{Ar})/(\text{O-Me} + \Sigma\text{O-Alk} + \text{Carboxyl} + \text{Carbonyl} + \text{Phenolic}))$ (Xu et al., 2017).

Рентгендифрактометрический анализ илистых фракций проводили на анализаторе HZG-4A X-ray (Carl Zeiss Jena, Германия). Сметиты диагностировали по широким отражениям с пиками 1.45 нм на дифрактограммах воздушно-сухих образцов и 1.7–1.8 нм на дифрактограммах образцов, сольватированных этиленгликолем.

Иллит (гидрослюдистый компонент) был диагностирован по наличию рефлексов в области 1.0, 0.5 и 0.334 нм образцов, снятых в трех состояниях.

Каолинит диагностировали по наличию рефлексов в области 0.715 и 0.357 нм, не изменяющих параметров при сольватации образцов этиленгликолем и исчезающих при прокаливании при 550 °С в течение 2 ч. В образцах каолинит представлен совершенной формой.

Хлорит диагностировали по наличию рефлексов в области в области 1.4, 0.474 и 0.354 нм.

Статистическую обработку результатов выполняли с использованием пакета Microsoft Excel 2010. Выбранный уровень значимости $p < 0.05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Компонентный состав свободных водоустойчивых микроагрегатов, локализованных в воздушно-сухих агрегатах (2–1 мм)

В состав свободных водоустойчивых микроагрегатов ($BCA_{\text{ми}}$), аналогично макроагрегатам ($BCA_{\text{ма}}$), входят неустойчивые ($mBCA_{\text{ми}} = LF_{\text{АГР}} + \text{ил}$) и устойчивые (остаток) в УЗ-поле микроагрегаты (табл. 1). Однако, в отличие от макроагрегатов (Артемьева и др., 2024), в свободных микроагрегатах практически отсутствует свободное ОВ ($LF_{\text{СВ}}$) (были обнаружены лишь следы).

Максимальное количество $mBCA$ внутри водоустойчивых микроагрегатов наблюдается в полнопрофильном и эродированном агрочерноземах, минимально наблюдаемое – в намытом (табл. 1), что сопровождается изменениями качественного состава $mBCA$, в первую очередь, за счет дискретного ОВ ($LF_{\text{АГР}}$).

В свободных микроагрегатах эродированного агрочернозема выявлено статистически достоверное ($t = 14.0$) резкое снижение количества дискретного ОВ ($LF_{\text{АГР}}$) по сравнению с таковым полнопрофильного варианта (почти в 2 раза), спровоцированное как эрозионными процессами, так и распашкой агрочерноземов. Следствием этого является вовлечение в состав пахотного горизонта эродированного агрочернозема почвенного материала нижележащего слоя с меньшим содержанием дискретного ОВ ($LF_{\text{АГР}}$), являющегося ядром неустойчивых в УЗ-поле микроагрегатов ($mBCA$) внутри водоустойчивых свободных микроагрегатов. Это сопровождалось незначительным (в 1.1 раза) увеличением доли их минеральной компоненты (ил).

В намытом агрочерноземе аккумулятивной зоны количество $LF_{\text{АГР}}$ восстанавливается (увеличивается почти в 1.7 раза относительно такового эродированного варианта), не достигая, тем не менее, уровня полнопрофильного варианта (табл. 1), что является следствием выноса эродированного материала, обогащенного дискретным ОВ, его переотложения и переупаковки/агрегирования в зоне аккумуляции (Gregorich et al., 1998; Kuhn, 2007; Kuhn et al., 2009).

Таблица 1. Компонентный состав водоустойчивых свободных микроагрегатов (< 0.25 мм), выделенных из воздушно-сухих агрегатов 2–1 мм

Table 1. Component composition of water-stable free microaggregates (< 0.25 mm) isolated from air-dried aggregates of 2–1 mm size

Вариант	ЛФ _{СВ}	Неустойчивые микроагрегаты (50–250 мкм), мВСА			Устойчивые микроагрегаты (1–50 мкм)
		ЛФ _{АГР}	Ил	Σ	
	% на массу фракции агрегатов				
несмытый	не обн.	2.64 ± 0.24	21.63 ± 0.72	24.27 ± 0.95	75.73 ± 0.95
смытый	не обн.	1.36 ± 0.19	22.89 ± 0.71	24.26 ± 0.69	75.74 ± 0.69
намытый	не обн.	2.29 ± 0.25	19.66 ± 0.11	21.95 ± 0.29	78.05 ± 0.29

Примечание. Органическая составляющая фракции остатка представлена, преимущественно, ОВ микроагрегатов илестых частиц, устойчивых в УЗ-поле (Федотов, Артемьева, 2015).

Note. The organic component of the Residue fraction is represented mainly by OM of microaggregates of clay particles that are stable in the ultrasound field (Fedotov, Artemyeva, 2015).

Минералогический анализ илистых частиц водоустойчивых свободных микроагрегатов

Минералогический анализ илистых частиц водоустойчивых свободных микроагрегатов выявил увеличение доли минералов с расширяющимся типом кристаллической решетки (сметиты), сопровождающееся снижением доли иллитов при переходе от полнoproфильного к эродированному и далее к намытому агрочерноземам, на фоне не меняющейся доли каолинита и хлорита (рис. 1).

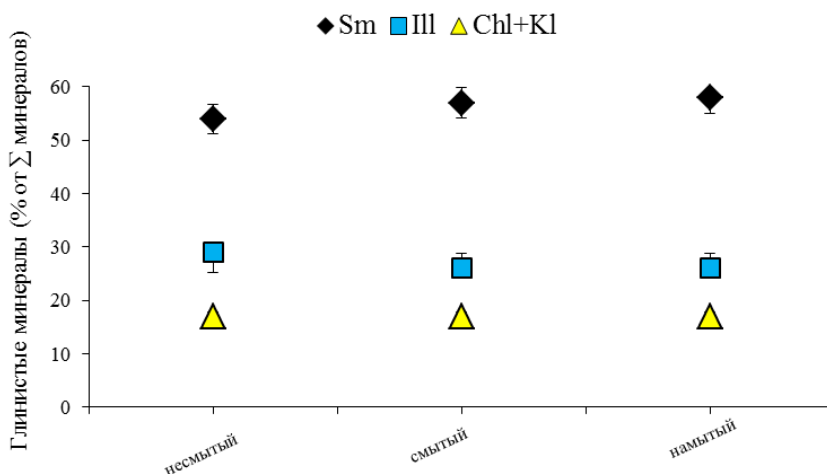


Рис. 1. Состав глинистых минералов в илистой фракции водоустойчивых свободных микроагрегатов агрочерноземов разной локализации на склоне катены.

Fig. 1. Composition of clay minerals in the Clay fraction of water-stable free microaggregates of agrochernozems of different localizations on the slope of a catena.

Увеличение количества сметитов в эрозионной зоне, по сравнению с таковым приводораздельного участка (рис. 1), свидетельствует о вовлечении минеральной матрицы обнажающегося (в

результате эрозионных процессов) ранее нижележащего слоя почвы в качестве основы для сорбции продуктов разложения ЛФ_{АГР}, а дальнейшее повышение доли смектитов при переходе от эродированного к намытому агрочернозему – о выносе наиболее тонкодисперсных глинистых минералов из эрозионной зоны и их отложении в зоне аккумуляции.

Качественный состав ОВ водоустойчивых свободных микроагрегатов

Агрегированное ОВ почвы (ЛФ_{АГР}) (ЛФ плотностью < 1.8 г/см³). Анализ легкогидролизуемой части ЛФ_{АГР} водоустойчивых свободных микроагрегатов явно демонстрирует ее активное обновление на эрозионном участке склона относительно приводораздельного участка. Пониженные величины выходы массы фракции, С и N после обработки 10%-ной HF в эродированном агрочерноземе относительно полнопрофильного варианта свидетельствуют об обогащенности ЛФ_{АГР} легкогидролизуемыми компонентами ОВ, что, по-видимому, обусловлено эффективным динамическим замещением ОВ *in situ* на эрозионном участке склона (табл. 2).

Сужение величины отношения С/N гидролизуемой части ЛФ_{АГР} в намытом агрочерноземе относительно эродированного варианта (34.8 против 40.2 соответственно) указывает на частичную минерализацию наиболее лабильных компонентов ЛФ_{АГР} в процессе его транспортировки из эрозионной зоны в аккумулятивную.

Относительные доли разных типов С в ¹³С-ЯМР-спектре ЛФ_{АГР} водоустойчивых свободных микроагрегатов приведены в таблице 3 и на рисунке 2.

¹³С-ЯМР-спектр ЛФ_{АГР} водоустойчивых свободных микроагрегатов полнопрофильного агрочернозема в основном мало отличается от такового макроагрегатов (Артемьева и др., 2024). В числе отдельных различий можно отметить незначительное увеличение (в 1.1 раза) по-прежнему доминирующих ароматических (ΣAg) фрагментов, вклад которых в общий спектр ЛФ_{АГР} превышает половину (52% общей интенсивности).

Таблица 2. Выход по массе фракций, С и N после обработки 10%-ной HF в водоустойчивых свободных микроагрегатах

Table 2. Yield of Mass, C and N in fractions after 10% HF-treatment within water-stable free microaggregates

Образец	Вариант	Выход по			Фактор обогащения		C/N		
		массе	С	N	С	N	до HF-обработки	после HF-обработки	гидролизуемое ОВ
		(%)							
ЛФ _{АГР}	несмытый	55	76	88	1.4	1.6	20.1	17.3	40.2
	смытый	54	70	82	1.3	1.5	23.1	19.4	39.5
	намытый	53	72	83	1.4	1.6	21.1	17.9	34.8
Ил	несмытый	16	52	47	3.3	3.0	9.5	10.9	8.5
	смытый	11	46	41	4.0	3.6	9.6	10.8	8.9
	намытый	13	45	42	3.4	3.2	9.8	11.0	9.3
Остаток	несмытый	14	59	56	4.1	3.9	12.9	12.2	12.1
	смытый	12	48	56	4.1	4.8	19.5	14.8	13.0
	намытый	12	77	67	6.3	5.5	11.6	13.7	8.3

Последнее обусловлено главным образом незамещенным ароматическим углеродом (Ag-C), доля которого возрастает относительно таковой в макроагрегатах в 1.1 раза на фоне незначительного снижения доли фенольного C, что свидетельствует о более глубокой степени микробной переработки органического материала ЛФ_{АГР} в свободных микроагрегатах по сравнению с таковой в макроагрегатах, в том числе, и таких устойчивых к разложению составляющих как лигнин и дубильные вещества (таннины и танниды) (табл. 3). Это сопровождается снижением вклада O-Alk фрагментов до 18% (в 1.1 раза).

В “углеводной” области спектра, аналогично таковому в макроагрегатах, наиболее выражен пик с максимумом около 74 м. д., что указывает на то, что в данном диапазоне спектра ЛФ_{АГР} полисахариды являются количественно наиболее значимыми компонентами. Тем не менее, снижение вклада O-Alk фрагментов в агрегированном ОВ свободных микроагрегатов относительно такового макроагрегатов обусловлено, главным образом, спиртовыми группами (60–94 м. д.): снизилось в 1.1 раза (табл. 3, рис. 2).

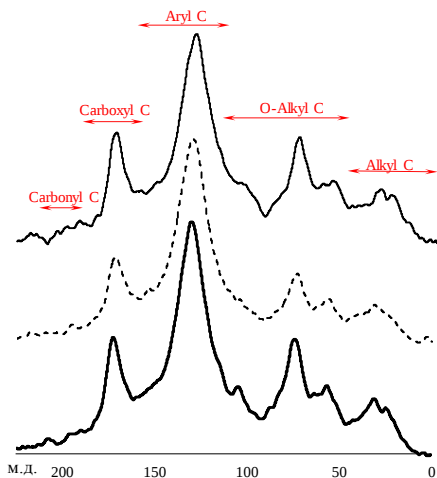
В ЛФ_{АГР} микроагрегатов вклад Alk-фрагментов практически не меняется относительно такового макроагрегатов, что хорошо согласуется с количеством липидов и полипептидов. Тем не менее, агрегированное ОВ свободных микроагрегатов полнопрофильного агрочернозема характеризуется чуть большей степенью гидрофобности (1.1 против 0.95 соответственно). Это обусловлено более резким снижением количества O-Alk фрагментов на фоне чуть менее резкого увеличения количества ароматических фрагментов (табл. 3).

Вклад углерода карбоксильных групп в агрегированном ОВ микроагрегатов практически не меняется по сравнению с таковым в макроагрегатах, а карбонильных групп – уменьшается в 1.2 раза (табл. 3).

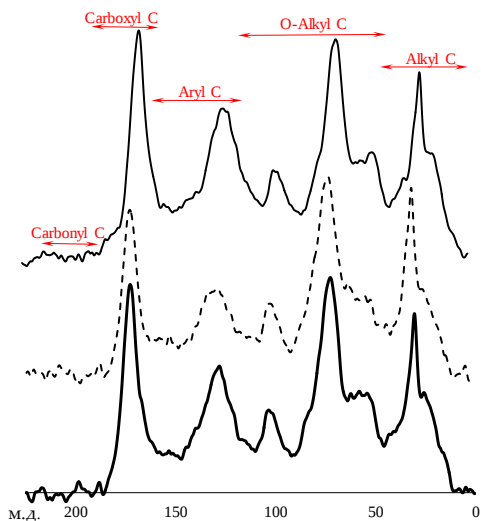
Степень разложенности ЛФ_{АГР} в свободных микроагрегатах выше относительно таковой макроагрегатов (0.63 против 0.57 соответственно), и сопровождается незначительным повышением степени ароматичности ОВ (0.50 против 0.46 соответственно). Величина отношения C/N стабильной части ОВ (негидролизуемой)

свободных микроагрегатов меняется мало – с незначительной тенденцией к снижению относительно таковой макроагрегатов (17.3 против 17.4 соответственно).

ЛФ_{АГР}



ИЛ



Остаток

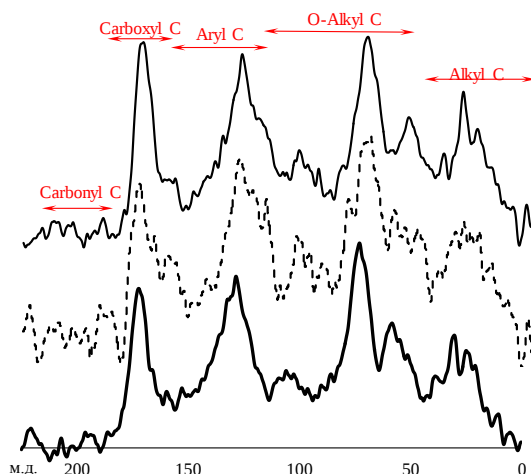


Рис. 2. Спектры разных пулов ОБ (ЛФ_{АГР}, ил, остаток) водоустойчивых свободных микроагрегатов агрочерноземов разной локализации на склоне, полученные методом твердофазной ¹³C-ЯМР-спектроскопии: 1 – полнопрофильный, 2 – смытый, 3 – намытый.

Fig. 2. Spectra of different OM pools (LF_{occ}, Clay, Residue) of water-stable free microaggregates of agrochernozems of different localization on the slope, obtained by solid-phase ¹³C-NMR spectroscopy: 1 – non-eroded, 2 –eroded, 3 – deposited.

Таким образом, агрегированное ОБ свободных микроагрегатов характеризуется чуть большей степенью разложения по сравнению с таковым макроагрегатов. Это находит отражение в увеличении вклада ароматических фрагментов и степени ароматичности ОБ и объясняется селективной микробной минерализацией и ассимиляцией O-Alk фрагментов (Baldock et al., 1992).

Спектры ЛФ_{АГР} в водоустойчивых свободных микроагрегатах, локализованных в агрочерноземах разной локализации на склоне, достаточно близки, однако, степень выраженности различий выше по сравнению с таковой макроагрегатов (табл. 3, рис. 2).

Таблица 3. Относительная интенсивность сигналов в ^{13}C -ЯМР-спектрах, C/N, DI – степень разложенности ОВ, ARI – степень ароматичности ОВ, HI – индекс гидрофобности ОВ разных фракций в составе водоустойчивых свободных микроагрегатов ($\text{BCA}_{\text{ми}}$) ($< 0.25 \text{ мм}$), а также количество липидов и пептидов, % общей интенсивности
Table 3. Relative intensity of signals in ^{13}C NMR spectra, C/N, DI – degree of decomposition of OM, ARI – degree of aromaticity of OM, HI – hydrophobicity index of OM of different fractions within water-stable free microaggregates (WSA_{mi}) ($< 0.25 \text{ mm}$), as well as the amount of lipids and peptides, % of the total intensity

Вариант	Alk	$\Sigma\text{CH-O}$	$\Sigma\text{O-Alk}$	Ar	Ar-O/N	ΣAr	COO	CHO	DI	ARI	HI	C/N	Lipids	Peptides
Агрегированное ОВ ($\text{ЛФ}_{\text{АГР}}$)														
несмытый	11.4	9.4	18.2	40.7	11.2	51.9	15.7	2.8	0.63	0.50	1.09	20.1	5.2	15.8
смытый	8.8	7.3	14.4	45.2	12.6	57.7	15.6	3.4	0.61	0.56	1.17	23.1	3.2	14.0
намытый	9.6	9.6	17.9	41.1	12.0	53.0	15.9	3.5	0.54	0.51	1.03	21.1	3.7	14.9
ОВ илистой фракции (ил)														
несмытый	20.8	14.3	24.4	24.0	8.2	32.2	21.6	1.0	0.85	0.31	0.81	9.5	10.4	26.1
смытый	24.9	17.1	27.8	19.5	7.2	26.7	19.1	1.5	0.90	0.25	0.80	9.6	15.2	24.6
намытый	22.3	16.2	27.2	22.2	7.1	29.3	21.2	0.0	0.82	0.28	0.80	9.8	12.4	25.0

Продолжение таблицы 3
Table 3 continued

Вариант	Alk	$\Sigma\text{CH-O}$	$\Sigma\text{O-Alk}$	Ar	Ar-O/N	ΣAr	COO	CHO	DI	ARI	HI	C/N	Lipids	Peptides
ОВ фракции остатка (остаток)														
несмытый	21.9	13.3	24.3	26.9	7.2	34.1	17.6	2.0	0.90	0.33	0.95	12.9	14.0	20.1
смытый	20.4	15.5	26.9	28.0	7.6	35.6	15.9	1.3	0.76	0.34	0.94	19.5	13.9	16.3
намытый	20.0	15.0	26.6	27.3	9.0	36.3	16.8	0.4	0.75	0.33	0.90	11.6	11.9	20.5

В противоположность агрегированному ОВ макроагрегатов, в свободных микроагрегатах доля О-Alk фрагментов уменьшается в эродированном агрочерноземе почти в 1.3 раза относительно таковой в полнопрофильном варианте в основном за счет спиртовых и метоксильной групп (табл. 3). Это предполагает интенсивную деградацию ЛФ_{АГР} в микроагрегатах, что приводит к потере наиболее легкоразлагаемых компонентов. Увеличение доли О-Alk фрагментов в намытом варианте происходит за счет всех типов С, входящих в диапазон 47–113 м. д., и свидетельствует в пользу выноса наиболее свежего материала растительного происхождения из эрозионной зоны с дальнейшим его отложением в аккумулятивной зоне.

Доля Alk фрагментов в агрегированном ОВ водоустойчивых свободных микроагрегатов снижается в 1.3 раза в эродированном агрочерноземе относительно полнопрофильного и далее увеличивается в намытом варианте (в 1.1 раза) относительно таковой эродированного. Это хорошо согласуется со снижением доли липидов (в 1.6 раза) и полипептидов (более чем в 1.1 раза) в эродированном варианте и их увеличением в намытом агрочерноземе (в 1.1 и 1.3 раза соответственно) (табл. 3).

Аналогично агрегированному ОВ макроагрегатов, максимальный вклад в общий спектр (52–58% общей интенсивности) ЛФ_{АГР} микроагрегатов вносят ароматические фрагменты ОВ (ΣAr). При этом максимальное количество ароматических фрагментов наблюдается в эродированном агрочерноземе (табл. 3), что, по-видимому, является следствием выхода на поверхность более глубоких слоев почвы и активизации разложения “старого” агрегированного ОВ (ЛФ_{АГР}), ранее защищенного в структурных отдельностях нижележащего слоя почвы до его выхода на поверхность.

Доля карбоксильных групп (COOH) снижается в ряду: намытый > несмытый > смытый, что указывает на меньшую степень окисленности ОВ в полнопрофильном и эродированном вариантах по сравнению с таковой намытого агрочернозема. Меньшая степень окисленности ОВ в эрозионной зоне может свидетельствовать о селективном сохранении наиболее устойчивых к разложению фрагментов лигнина, а ее увеличение в намытом ва-

рианте – об отложении в аккумулятивной зоне более окисленного ОВ. Однако увеличение доли карбонильной группы в эродированном и намытом агрочерноземах относительно таковой полнопрофильного варианта свидетельствует о разложении, в том числе, “старого” агрегированного ОВ, нижележащего слоя почвы до его выхода на поверхность.

Показатели химической структуры стабильной части $ЛФ_{АГР}$ свободных микроагрегатов эродированного агрочернозема отражают его активное обновление на эрозионном участке склона относительно приводораздельного участка. Это находит отражение в чуть меньшей степени разложенности стабильной части $ЛФ_{АГР}$ микроагрегатов эродированного агрочернозема, по сравнению с таковой полнопрофильного варианта (DI: 0.61 против 0.63 соответственно), и согласуется с повышенной величиной отношения C/N стабильной части $ЛФ_{АГР}$ эродированного агрочернозема относительно таковой полнопрофильного варианта: 19.4 против 17.3 соответственно (табл. 3).

Тем не менее, повышенные индексы ароматичности (AR1: 0.56 против 0.50 соответственно) и гидрофобности (HI: 1.2 против 1.1 соответственно) в определенной степени свидетельствуют в пользу его несколько большей зрелости $ЛФ_{АГР}$ в эродированном агрочерноземе относительно таковых полнопрофильного варианта. В тоже время это может быть следствием пополнения пула свободных микроагрегатов за счет фрагментов разрушенных, не только новообразованных макроагрегатов, но и “старых” из вышедшего на поверхность (в результате эрозионных событий) ранее нижележащего слоя почвы.

Таким образом, химическая структура стабильной части $ЛФ_{АГР}$ свободных микроагрегатов эродированного агрочернозема свидетельствует о пополнении этого пула ОВ из фрагментов разрушенных макроагрегатов, как “старых” из почвенного слоя, обнажающегося при эрозионных процессах, так и новообразованных в результате динамического замещения ОВ *in situ*. Их доли примерно одинаковы, тем не менее, более высокая величина отношения C/N в эродированном агрочерноземе свидетельствует в пользу несколько большего количества $ЛФ_{АГР}$, высвобождающегося из разрушенных новообразованных макроагрегатов. Изложенная ин-

формация опосредованно свидетельствует об эффективном динамическом замещении ОВ на эрозионном участке склона.

Интегральные показатели химической структуры ЛФ_{АГР} свободных микроагрегатов, аналогично макроагрегатам, в намытом агрочерноземе демонстрируют явные признаки слабой разложённости относительно таковых эродированного варианта: меньшие индексы разложённости, гидрофобности и ароматичности (DI: 0.54 против 0.61 соответственно, ARI: 0.51 против 0.56 соответственно и HI: 1.03 против 1.17 соответственно), что может быть опосредованным свидетельством, в том числе транспортировки из эрозионной зоны микроагрегатов, представленных преимущественно фрагментами разрушенных новообразованных макроагрегатов размера микроагрегатов (< 0.25 мм).

ОВ илстых фракций почвы (ил). Анализ легкогидролизуемой части ОВ илистой фракции водоустойчивых свободных микроагрегатов, аналогично таковой макроагрегатов, также свидетельствует в пользу ее активного обновления на эрозионном участке склона относительно приводораздельного участка. Пониженные величины выходы массы фракции, С и N после обработки 10% HF в эродированном агрочерноземе относительно полнопрофильного варианта свидетельствуют об обогащенности ОВ илистой фракции легкогидролизуемыми компонентами, что, по-видимому, обусловлено эффективным динамическим замещением ОВ *in situ* на эрозионном участке склона (табл. 2).

Это хорошо согласуется с чуть повышенной величиной отношения C/N гидролизуемой части ОВ илистой фракции свободных микроагрегатов эродированного агрочернозема, по сравнению с таковой полнопрофильного варианта (8.9 против 8.5 соответственно), свидетельствующей в пользу преобладания в эрозионной зоне фрагментов/осколков новообразованных макроагрегатов размера микроагрегатов (< 0.25 мм).

Аналитические данные свидетельствуют, что ОВ илистой фракции водоустойчивых свободных микроагрегатов, аналогично таковому макроагрегатов, в отличие от ЛФ_{АГР}, в значительно меньшей степени подвержено трансформации в ходе транспортной фазы, что, по-видимому, обусловлено в том числе более прочной связью ОВ с минеральной матрицей. В пользу этого свиде-

тельствуют более высокие величины отношения C/N в намытом агрочерноземе по сравнению с таковыми эродированного варианта его гидролизуемой части (9.3 против 8.9 соответственно).

¹³C-ЯМР-спектр ОВ илистой фракции свободных микроагрегатов практически идентичен таковому макроагрегатов (табл. 3, рис. 2). В числе различий можно отметить незначительное снижение в свободных микроагрегатах относительно макроагрегатов вкладов O-Alk и Alk фрагментов (менее чем в 1.1 раза) на фоне увеличения ароматических фрагментов (в 1.1 раза) и карбоксильных групп (23 против 22% соответственно) (табл. 3). Столь незначительные изменения во вкладах основных типов C находят отражение в практически неизменных интегральных показателях химической структуры стабильной части ОВ илистой фракции свободных микроагрегатов относительно таковых макроагрегатов: степень разложенности (DI: 0.85 против 0.87 соответственно), степень ароматичности ARI (0.31 против 0.29 соответственно) и степень гидрофобности ОВ (HI: 0.81 против 0.82 соответственно). Это согласуется с близкой величиной отношения C/N стабильной части ОВ илистой фракции свободных микроагрегатов и макроагрегатов: 10.9 против 10.2 (табл. 3).

Между спектрами ОВ илистой фракции свободных микроагрегатов агрочерноземов, приуроченных к разным позициям на склоне наблюдаются некоторые различия, в числе которых можно отметить следующие. ОВ илистой фракции свободных микроагрегатов эродированного агрочернозема характеризуется повышенной долей O-Alk фрагментов относительно таковой полнопрофильного агрочернозема: 28 против 24% общей интенсивности. Причем прирост O-Alk фрагментов в эродированном агрочерноземе обусловлен в основном спиртовыми группами (в 1.2 раза), т. е. происходит за счет наиболее легкоокисляемых фрагментов (табл. 3). В намытом варианте доля O-Alk фрагментов чуть понижается относительно таковой эродированного варианта (27.2 против 27.8% соответственно), также в основном за счет спиртовых групп (снижение в 1.1 раза).

Доля Alk фрагментов в ОВ илистой фракции в свободных микроагрегатах эродированного агрочернозема повышается в 1.2 раза, что хорошо согласуется с увеличением количества липидов

(почти в 1.5 раза) и может быть следствием бóльшего присутствия продуктов жизнедеятельности и распада новосинтезированной микробной биомассы с высоким содержанием Alk фрагментов. В намытом варианте доля Alk фрагментов незначительно снижается (в 1.1 раза) относительно таковой эродированного варианта, и при этом снижается вклад липидов (в 1.2 раза).

Вклад ароматических фрагментов ОВ (ΣAr) в эродированном агрочерноземе ниже (более чем 1.2 раза) относительно полнопрофильного варианта, в намытом варианте – выше в 1.1 раза относительно эродированного агрочернозема (табл. 3). Минимальное количество ароматических фрагментов в эродированном агрочерноземе свидетельствует в пользу высокой интенсивности процессов динамического замещения ОВ в эрозионной зоне, которое очень эффективно компенсирует потерю ОВ в результате эрозионных процессов. Это согласуется с меньшей степенью окисленности ОВ илистой фракции эродированного агрочернозема: вклад карбоксильных групп снижается (более чем в 1.1 раза) относительно такового полнопрофильного агрочернозема (табл. 3).

Таким образом, химическая структура ОВ илистой фракции свободных микроагрегатов агрочерноземов, приуроченных к разным позициям на склоне, свидетельствует о высокой эффективности процессов динамического замещения ОВ в эрозионной зоне на фоне поступления свежего ОВ (культурная растительность). При этом, признаков разложения “старого” ОВ илистой фракции нижележащего слоя почвы до его выхода на поверхность практически не наблюдается, исключая карбонильные группы, доля которых увеличивается (более чем в 1.4 раза). Интегральные показатели химической структуры ОВ илистой фракции свободных микроагрегатов эродированного агрочернозема свидетельствуют о более высокой интенсивности процессов динамического замещения по сравнению интенсивностью разложения ОВ: степень разложенности (DI) составляет 0.9 на фоне пониженных, по сравнению с таковыми полнопрофильного агрочернозема, индексов ароматичности (ARI: 0.25 против 0.31 соответственно) и гидрофобности ОВ (HI: 0.80 против 0.81 соответственно). Это согласуется с практически одинаковой величиной отношения C/N стабильной части ОВ илистой фракции эродированного агрочернозема относительно

таковой полнопрофильного варианта: 10.8 против 10.9 соответственно (табл. 3).

Все это свидетельствует в пользу преобладания в эрозионной зоне фрагментов размера микроагрегатов (< 0.25 мм) разрушенных новообразованных макроагрегатов.

Интегральные показатели химической структуры ОВ илистой фракции свободных микроагрегатов, аналогично макроагрегатам, свидетельствуют о меньшей степени разложенности стабильной части ОВ или в намытом агрочерноземе относительно эродированного варианта: меньшая степень разложенности (DI: 0.82 против 0.90) на фоне одинаковых/сопоставимых индексов ароматичности (ARI: 0.28 против 0.25 соответственно) и гидрофобности ОВ (HI: 0.80), а также величины отношения C/N стабильной части ОВ (11.0 против 10.8 соответственно), что предполагает транспортировку из эрозионной зоны микроагрегатов, представленных, преимущественно фрагментами разрушенных новообразованных макроагрегатов.

ОВ фракции остатка. Анализ легкогидролизуемой части ОВ фракции остатка водоустойчивых свободных микроагрегатов, в отличие от таковой макроагрегатов, явно свидетельствует о его обновлении на эрозионном участке склона относительно приводораздельного участка. Пониженные величины выходы массы, C и N после обработки 10%-ной HF в эродированном агрочерноземе относительно полнопрофильного варианта, несомненно, указывают на обогащенность ОВ фракции остатка легкогидролизуемыми компонентами, что, по-видимому, обусловлено эффективным динамическим замещением ОВ *in situ* на эрозионном участке склона (табл. 2). Это хорошо согласуется с повышенной величиной отношения C/N гидролизуемой части ОВ фракции остатка, по сравнению с таковой полнопрофильного варианта (13.0 против 12.1 соответственно), свидетельствующей в пользу преобладания в эрозионной зоне фрагментов/осколков размера микроагрегатов (< 0.25 мм) разрушенных новообразованных макроагрегатов.

Снижение величины отношения C/N гидролизуемой части ОВ фракции остатка в намытом агрочерноземе относительно эродированного варианта (8.3 против 13.0 соответственно), бесспорно, свидетельствует о частичной минерализации его наиболее ла-

бильных компонентов в процессе транспортировки из эрозионной зоны в аккумулятивную.

В ^{13}C -ЯМР-спектре ОВ фракции остатка свободных микроагрегатов мало отличается от такового макроагрегатов (рис. 2). В числе отдельных различий можно отметить незначительное снижение вклада О-Alk (менее чем в 1.1 раза) в основном за счет спиртовых групп, ароматических фрагментов (менее чем в 1.1 раза) на фоне увеличения вкладов Alk фрагментов (более чем в 1.1 раза) и карбонильных групп (в 1.3 раза), а также несущественного увеличения доли карбоксильных групп (17.6 против 17.4% соответственно) (табл. 3).

Эти изменения вкладов основных типов С находят отражение в изменении величин интегральных показателей химической структуры стабильной части ОВ фракции остатка свободных микроагрегатов относительно таковых макроагрегатов: степень разложенности (DI: 0.9 против 0.8 соответственно), степень ароматичности ARI (0.33 против 0.34 соответственно) и степень гидрофобности ОВ (HI: 0.95 против 0.89 соответственно). Это согласуется с пониженной величиной отношения C/N стабильной части ОВ фракции остатка свободных микроагрегатов по сравнению с таковой макроагрегатов: 12.2 против 13.1 соответственно (табл. 3).

Между спектрами ОВ фракции остатка свободных микроагрегатов в агрочерноземах, приуроченных к разным позициям на склоне, наблюдаются различия, в числе которых можно отметить следующие (табл. 3, рис. 2). В зависимости от локализации на склоне вклад О-Alk фрагментов ОВ фракции остатка незначительно увеличивается в ряду: несмытый < намытый < смытый (табл. 3). Прирост О-Alk фрагментов в эродированном агрочерноземе обусловлен в основном спиртовыми группами, т. е. наиболее легкоокисляемыми фрагментами, что предполагает обновление фракции остатка свободных микроагрегатов за счет разрушения в большей степени новообразованных (в результате динамического замещения ОВ) мВСА_{ма}. В намытом варианте доля О-Alk фрагментов чуть снижается относительно таковой эродированного агрочернозема (26.6 против 26.9 соответственно) также в основном за счет спиртовых групп.

Доля Alk фрагментов в ОВ фракции остатка снижается в ряду: несмытый > смытый > намытый, что согласуется с характером распределения количества липидов в агрочерноземах разной локализации на склоне (табл. 3). Следует отметить, что Alk-С эродированного агрочернозема качественно отличается от такового полнопрофильного варианта: если в спектре ОВ полнопрофильного агрочернозема хорошо выражен пик с максимумом около 30 м. д., а с максимумом около 20 м. д. пик практически отсутствует, то в эродированном агрочерноземе интенсивность сигналов с максимумом около 30 м. д. и 20 м. д. становится соизмеримой, что может свидетельствовать о меньшей доле длинноцепочечных соединений в алкильной области спектра по сравнению с таковой в макроагрегатах. В намытом агрочерноземе отмеченная тенденция носит еще более выраженный характер (рис. 2). Это, наряду со снижением доли Alk фрагментов, находит отражение в величине индекса гидрофобности (HI): он максимален в полнопрофильном агрочерноземе, минимален – в намытом варианте.

Вклад ароматических фрагментов ОВ (ΣAg) фракции остатка свободных микроагрегатов в эродированном агрочерноземе незначительно увеличивается относительно такового полнопрофильного варианта (36.6 против 34.1% соответственно) (табл. 3). Это может быть следствием разрушения, в том числе, “старых” мВСА_{ми}, которые были ранее защищены в свободных микроагрегатах нижележащего слоя почвы до его выхода на поверхность. Тем не менее, интенсивность разрушения “старых” и новообразованных мВСА_{ми} примерно одинакова, но с чуть большей интенсивностью разрушения новообразованных мВСА_{ми}, о чем свидетельствует увеличение вклада фенольного С (Ar-O/N), т. е. наиболее легкоокисляемых фрагментов ароматической части ОВ. В намытом агрочерноземе аккумулятивной зоны вклад ароматических фрагментов увеличивается относительно такового эродированного варианта, что предполагает частичное разложение ОВ, вынесенного из эрозионной зоны, в процессе его транспортировки и отложения в аккумулятивной зоне. В то же время увеличение доли фенольного С (Ar-O/N) в намытом агрочерноземе, по сравнению с таковой эродированного варианта (почти в 1.2 раза), на фоне незначительного снижения доли незамещенного ароматиче-

ского углерода (Ar) свидетельствует в пользу пополнения ОВ фракции остатка, в том числе за счет смешения поступившего с эрозионной позиции склона с таковым аккумулятивной зоны.

Доля карбоксильных и карбонильных групп в эродированном агрочерноземе снижается относительно таковой полнопрофильного варианта (более чем в 1.1 и 1.5 раза соответственно), отражая меньшую степень окисленности и присутствие продуктов окислительной деполимеризации лигнина, что также свидетельствует в пользу обновления фракции остатка за счет разрушения, в большей степени, новообразованных мВСА_{ми}. В намытом агрочерноземе отмечено увеличение доли карбоксильных групп (в 1.1 раза) (табл. 10), что может быть следствием поступления более “старого” окисленного ОВ в аккумулятивную зону в результате возможного частичного разложения ОВ фракции остатка в процессе его транспортировки с эродирующей позиции склона и дальнейшего его отложения в аккумулятивной зоне.

Таким образом, химическая структура ОВ фракции остатка свободных микроагрегатов агрочерноземов, приуроченных к разным позициям на склоне, также свидетельствует об обновлении фракции остатка в эрозионной зоне за счет разрушения преимущественно новообразованных мВСА_{ми}, о чем свидетельствуют интегральные показатели химической структуры ОВ: меньшая степень разложенности (DI: 0.76 против 0.90 соответственно) на фоне практически одинаковых индексов ароматичности (ARI: 0.34 против 0.33 соответственно), наряду с меньшей степенью гидрофобности ОВ (HI: 0.94 против 0.95 соответственно). Это хорошо согласуется с повышенной величиной отношения C/N стабильной части ОВ фракции остатка эродированного агрочернозема относительно таковой полнопрофильного варианта: 14.8 против 12.2 соответственно (табл. 3).

Интегральные показатели химической структуры фракции остатка свободных микроагрегатов, аналогично макроагрегатам, в намытом агрочерноземе практически не меняются относительно таковых эродированного варианта (DI: 0.75 против 0.76 соответственно, ARI: 0.33 против 0.34 соответственно, и HI: 0.90 против 0.94 соответственно), что также может быть косвенным свидетельством транспортировки из эрозионной зоны микроагрегатов,

представленных фрагментами разрушенных, преимущественно новообразованных макроагрегатов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены оригинальные экспериментальные данные по строению и структуре относительно гомогенных компонентов ОБ водоустойчивых свободных микроагрегатов агрочерноземов разной локализации на склоне. Дана оценка изменения их химической структуры в денудационно-аккумулятивном ландшафте.

Показано, что подавляющая часть водоустойчивых свободных микроагрегатов в эрозионной зоне представлена фрагментами/осколками разрушенных новообразованных макроагрегатов (за счет динамического замещения ОБ *in situ*), что наглядно демонстрируют интегральные показатели химической структуры стабильной части всех пулов ОБ свободных микроагрегатов, наряду с данными анализа их легкогидролизуемой части.

Аналитические данные свидетельствуют в пользу преобладающей транспортировки микроагрегатов, представленных фрагментами разрушенных, преимущественно новообразованных макроагрегатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Артемьева З.С., Данченко Н.Н., Кириллова Н.П., Масютенко Н.П., Дубовик Е.В., Кузнецов А.В., Козут Б.М. Изменение компонентного состава органического вещества макро- и микроагрегатов типичного чернозема под воздействием эрозионных процессов // Почвоведение. 2021. № 11. С. 1322–1331.
2. Артемьева З.С., Данченко Н.Н., Колягин Ю.Г., Варламов Е.Б., Засухина Е.С., Цомаева Е.В., Козут Б.М. Химическая структура органического вещества агрочерноземов разных позиций на склоне // Почвоведение. 2023. № 6. С. 703–714.
3. Артемьева З.С., Колягин Ю.Г., Засухина Е.С., Цомаева Е.В., Ярославцева Н.В., Козут Б.М. Химическая структура органического вещества водоустойчивых макроагрегатов агрочерноземов разных позиций на склоне // Почвоведение. 2024. № 7. С. 983–996.
4. Данченко Н.Н., Артемьева З.С., Колягин Ю.Г., Козут Б.М. Сравнительный анализ гумусовых веществ и органического вещества физических фракций чернозема типичного // Почвоведение. 2022. № 10.

С. 1241–1254.

5. *Ермолаев О.П.* Пояса эрозии в природно-антропогенных ландшафтах речных бассейнов. Казань: Изд-во Казанского ун-та, 1992. 147 с.
6. Классификация и диагностика почв СССР. М.: Колос, 1977. 223 с.
7. *Когут Б.М., Артемьева З.С., Кириллова Н.П., Яшин М.А., Сошникова Е.И.* Компонентный состав органического вещества воздушно-сухих и водоустойчивых макроагрегатов 2–1 мм типичного чернозема в условиях контрастного землепользования // Почвоведение. 2019. № 2. С. 161–170.
8. *Травникова Л.С., Артемьева З.С., Сорокина Н.П.* Распределение грануло-денсиметрических фракций в дерново-подзолистых почвах, подверженных плоскостной эрозии // Почвоведение. 2010. № 4. С. 495–504.
9. *Федотов Г.Н., Артемьева З.С.* Коллоидная составляющая грануло-денсиметрических фракций почв // Почвоведение. 2015. № 1. С. 61–70.
10. *Хан Д.В.* Органо-минеральные соединения и структура почвы. М.: Наука, 1969. 141 с.
11. *Цомаева Е.В., Артемьева З.С., Засухина Е.С., Варламов Е.Б.* Несиликатное железо минерально-ассоциированного органического вещества агрочерноземов разной локализации на склоне // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2023. Вып. 115. С. 54–86. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2023-115-54-86>.
12. *Чуков С.Н., Лодыгин Е.Д., Абакумов Е.В.* Использование ^{13}C ЯМР-спектроскопии в исследовании органического вещества почв (обзор) // Почвоведение. 2018. № 8. С. 952–964.
13. *Artemyeva Z., Danchenko N., Kolyagin Yu., Kirillova N., Kogut B.* Chemical structure of soil organic matter and its role in aggregate formation in Haplic Chernozem under the contrasting land use variants // Catena. 2021. Vol. 204. P. 105403.
14. *Baldock J.A., Oades J.M., Vassallo A.M., Wilson M.A.* Solid-state CP/MAS ^{13}C NMR analysis of bacterial and fungal cultures isolated from a soil incubated with glucose // Aust. J. Soil Res. 1990. Vol. 28. P. 213–225.
15. *Baldock J.A., Oades J.M., Waters A.G. et al.* Aspects of the chemical structure of soil organic materials as revealed by solid-state ^{13}C NMR spectroscopy // Biogeochemistry. 1992. Vol. 16. P. 1–42.
16. *Beare M.H., Cabrera M.L., Hendrix P.F., Coleman D.C.* Aggregate-protected and unprotected pools of organic matter in conventional and no-tillage ultisols // Soil Sci. Soc. Am. J. 1994. Vol. 58. P. 787–795.
17. FAO, ITPS, 2015. Status of the World's Soil Resources (SWSR). Main Report, Rome.
18. *Gregorich E.G., Greer K.J., Anderson D.W., Liang B.C.* Carbon

distribution and losses, erosion and deposition effects // *Soil & Tillage Research*. 1998. Vol. 47(3). P. 291–302.

19. Gupta V.V.S.R., Germida J.J. Distribution of microbial biomass and its activity in different soil aggregate size classes as affected by cultivation // *Soil Biology & Biochemistry*. 1988. Vol. 20. P. 777–786.

20. Hatcher P.G., Schnitzer M., Dennis L.W., Maciel G.E. Aromaticity of humic substances in soils // *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1981. Vol. 45. P. 1089–1094.

21. Kuhn N.J. Erodibility of soil and organic matter, independence of organic matter resistance to interrill erosion // *Earth Surface Processes and Landforms*. 2007. Vol. 32. P. 794–802.

22. Kuhn N.J., Hoffmann T., Schwanghart W., Dotterweich M. Agricultural soil erosion and global carbon cycle, controversy over? // *Earth Surface Processes and Landforms*. 2009. Vol. 34. P. 1033–1038.

23. Le Bissonnais Y. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility. P. I. Theory and methodology // *Eur. J. Soil Sci.* 1996. Vol. 47. P. 425–437.

24. Six J., Elliott E.T., Paustian K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: A mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture // *Soil Biol. Biochem.* 2000. Vol. 32. P. 2099–2103.

25. Tisdall J.M., Oades J.M. Organic matter and water-stable aggregates in soils // *J. Soil Sci.* 1982. Vol. 33. P. 141–163.

26. World Reference Base for Soil Resources. International Soil Classification System for Naming Soils and Creating Legends for Soil Maps, 4th ed., International Union of Soil Sciences (IUSS), Vienna, 2022. 236 p.

27. Xu S., Silveira M.L., Ngatia L.W., Normand A.E., Sollenberger L.E., Reddy K.R. Carbon and nitrogen pools in aggregate size fractions as affected by sieving method and land use intensification // *Geoderma*. 2017. Vol. 305. P. 70–79.

REFERENCES

1. Artemyeva Z.S., Danchenko N.N., Kirillova N.P., Masyutenko N.P., Dubovik E.V., Kuznetsov A.V., Kogut B.M., *Izmenenie komponentnogo sostava organicheskogo veshchestva makro- i mikroagregatov tipichnogo chernozema pod vozdeystviem erozionnyh processov* (Changes in the component composition of organic matter of macro- and microaggregates of typical chernozem under the influence of erosion processes), *Pochvovedenie*, 2021, No. 11, pp. 1322–1331.

2. Artemyeva Z.S., Danchenko N.N., Kolyagin Yu.G., Varlamov E.B., Zasukhina E.S., Tsomaeva E.V., Kogut B.M., *Chemical Structure of Organic Matter of Agrochernozems in Different Slope Positions*, *Eurasian Soil*

Science, 2023b, Vol. 56(6), pp. 705–714.

3. Artemyeva Z.S., Kolyagin Yu.G., Zasukhina E.S., Tsomaeva E.V., Yaroslavtseva N.V., Kogut B.M., Khimicheskaya struktura organicheskogo veshchestva vodoustojchivyykh makroagregatov agrochernozemov raznykh pozitsij na sklone (Chemical structure of organic matter of water-stable macroaggregates of agrochernozems of different positions on a slope), *Pochvovedenie*, 2024, No. 7, pp. 983–996.
4. Danchenko N.N., Artemyeva Z.S., Kolyagin Yu.G., Kogut B.M., Sravnitelnyj analiz gumusovykh veshchestv i organicheskogo veshchestva fizicheskikh fraktsij chernozema tipichnogo (Comparative analysis of humic substances and organic matter of physical fractions of typical chernozem), *Pochvovedenie*, 2022, No. 10, pp. 1241–1254.
5. Ermolaev O.P., *Poyasa erozii v prirodno antropogennykh landshaftakh rechnykh bassejnov* (Erosion belts in natural and anthropogenic landscapes of river basins), Kazan: Izd-vo Kazanskogo un-ta, 1992, 147 p.
6. Classification and diagnostics of soils of the USSR, Moscow: Kolos, 1977, 223 p.
7. Kogut B.M., Artemyeva Z.S., Kirillova N.P., Yashin M.A., Soshnikova E.I., Komponentnyj sostav organicheskogo veshchestva vozdušno sukhikh i vodoustojchivyykh makroagregatov 2–1 mm tipichnogo chernozema v usloviyakh kontrastnogo zemlepolzovaniya (Component composition of organic matter of air-dry and water-stable macroaggregates of 2–1 mm typical chernozem under conditions of contrasting land use), *Pochvovedenie*, 2019, No. 2, pp. 161–170.
8. Travnikova L.S., Artemeva Z.S., Sorokina N.P., Distribution of the particle-size fractions in soddy-podzolic soils subjected to sheet erosion, *Eurasian Soil Science*, 2010, Vol. 43(4), pp. 459–467.
9. Fedotov G.N., Artemeva Z.S., Kolloidnaya sostavlyayushchaya granulodensimetricheskikh fraktsij pochv (Colloidal component of granulodensimetric fractions of soils), *Pochvovedenie*, 2015, No. 1, pp. 61–70.
10. Khan D.V., *Organo mineralnye soedineniya i struktura pochvy* (Organomineral compounds and soil structure), Moscow: Nauka, 1969, 141 p.
11. Tsomaeva E.V., Artemyeva Z.S., Zasukhina E.S., Varlamov E.B., Non-silicate iron in mineral-associated organic matter of agro-chernozems located on different positions on the slope, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2023, Vol. 115, pp. 54–86, DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2023-115-54-86>.
12. Chukov S.N., Lodygin E.D., Abakumov E.V., Ispolzovanie ¹³S YAMR spektroskopii v issledovanii organicheskogo veshchestva pochv (obzor) (Use of ¹³C NMR spectroscopy in the study of soil organic matter (review)), *Pochvovedenie*, 2018, No. 8, pp. 952–964.
13. Artemyeva Z., Danchenko N., Kolyagin Yu., Kirillova N., Kogut B.,

Chemical structure of soil organic matter and its role in aggregate formation in Haplic Chernozem under the contrasting land use variants, *Catena*, 2021, Vol. 204, pp. 105403.

14. Baldock J.A., Oades J.M., Vassallo A.M., Wilson M.A., Solid-state CP/MAS ^{13}C NMR analysis of bacterial and fungal cultures isolated from a soil incubated with glucose, *Aust. J. Soil Res.*, 1990, Vol. 28, pp. 213–225.

15. Baldock J.A., Oades J.M., Waters A.G. et al., Aspects of the chemical structure of soil organic materials as revealed by solid-state ^{13}C NMR spectroscopy, *Biogeochemistry*, 1992, Vol. 16, pp. 1–42.

16. Beare M.H., Cabrera M.L., Hendrix P.F., Coleman D.C., Aggregate-protected and unprotected pools of organic matter in conventional and no-tillage ultisols, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1994, Vol. 58, pp. 787–795.

17. FAO, ITPS, 2015. Status of the World's Soil Resources (SWSR). Main Report, Rome.

18. Gregorich E.G., Greer K.J., Anderson D.W., Liang B.C., Carbon distribution and losses, erosion and deposition effects, *Soil & Tillage Research*, 1998, Vol. 47(3), pp. 291–302.

19. Gupta V.V.S.R., Germida J.J., Distribution of microbial biomass and its activity in different soil aggregate size classes as affected by cultivation, *Soil Biology & Biochemistry*, 1988, Vol. 20, pp. 777–786.

20. Hatcher P.G., Schnitzer M., Dennis L.W., Maciel G.E., Aromaticity of humic substances in soils, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1981, Vol. 45, pp. 1089–1094.

21. Kuhn N.J., Erodibility of soil and organic matter, independence of organic matter resistance to interrill erosion, *Earth Surface Processes and Landforms*, 2007, Vol. 32, pp. 794–802.

22. Kuhn N.J., Hoffmann T., Schwanghart W., Dotterweich M., Agricultural soil erosion and global carbon cycle, controversy over? *Earth Surface Processes and Landforms*, 2009, Vol. 34, pp. 1033–1038.

23. Le Bissonnais Y., Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility. P. I. Theory and methodology, *Eur. J. Soil Sci.*, 1996, Vol. 47, pp. 425–437.

24. Six J., Elliott E.T., Paustian K., Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: A mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture, *Soil Biol. Biochem.*, 2000, Vol. 32, pp. 2099–2103.

25. Tisdall J.M., Oades J.M., Organic Matter and Water-Stable Aggregates in Soils, *J. Soil Sci.*, 1982, Vol. 33, pp. 141–163.

26. World Reference Base for Soil Resources. International Soil Classification System for Naming Soils and Creating Legends for Soil Maps, 4th ed., International Union of Soil Sciences (IUSS), Vienna, 2022. 236 p.

27. Xu S., Silveira M.L., Ngatia L.W., Normand A.E., Sollenberger L.E., Reddy K.R., Carbon and nitrogen pools in aggregate size fractions as affected

Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2025. Вып. 123
Dokuchaev Soil Bulletin, 2025, 123

by sieving method and land use intensification, *Geoderma*, 2017, Vol. 305, pp. 70–79.

УДК 631.416.9

DOI: 10.19047/0136-1694-2025-123-148-178



Ссылки для цитирования:

Кучеренко А.В., Бирюкова О.А. Содержание микроэлементов в черноземе южном плодового агроценоза // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2025. Вып. 123. С. 148-178. DOI: 10.19047/0136-1694-2025-123-148-178

Cite this article as:

Kucherenko A.V., Biryukova O.A., Content of trace elements in calcic chernozem of fruit agrocenosis, Dokuchaev Soil Bulletin, 2025, V. 123, pp. 148-178, DOI: 10.19047/0136-1694-2025-123-148-178

Содержание микроэлементов в черноземе южном плодового агроценоза

© 2025 г. А. В. Кучеренко*, О. А. Бирюкова**

*Южный федеральный университет,
Академия биологии и биотехнологии им. Д. И. Ивановского, Россия,
344080, Ростов-на-Дону, пр-т Стачки, 194/1,*

*<https://orcid.org/0000-0003-4759-7185>, e-mail: alkucherenko@bk.ru,

**<https://orcid.org/0000-0001-9748-3296>, e-mail: oabirukova@sfn.ru.

*Поступила в редакцию 11.11.2024, после доработки 13.02.2025,
принята к публикации 03.06.2025*

Резюме: Устойчивое функционирование плодовых агроценозов и получение экологически чистой продукции невозможны без оценки микроэлементного состава почв. В работе представлены результаты изучения содержания и распределения меди, марганца, цинка, железа и никеля в черноземе южном при возделывании черешни (*Prunus avium* L.) в южной зоне садоводства Ростовской области. Отбор почвенных образцов осуществляли по слоям: 0–20, 20–40, 40–60, 60–80, 80–100 см. Для всех рассматриваемых элементов установлен аккумулятивный тип профильного распределения с наибольшим накоплением в гумусово-аккумулятивном горизонте 0–40 см. Определены запасы микроэлементов в метровом слое почвы. По уровню содержания Cu, Mn, Zn, Fe и Ni можно расположить в следующих убывающих рядах: валовые – Fe > Mn > Zn > Ni > Cu; подвижные – Mn > Fe > Cu > Ni > Zn. Доля подвижных Cu, Zn, Ni, Fe от их общего содержания во всех слоях чернозема южного очень низкая – от 0.02 до 0.45%, для Mn – от 1.67 до 2.04%. Выявлено,

что содержание карбонатов является одним из ключевых факторов, определяющих подвижность микроэлементов в черноземе южном. Установлена обратная корреляционная связь между исследуемыми подвижными соединениями микроэлементов и количеством карбонатов (для Cu $r = -0.88$, для Mn $r = -0.85$, для Zn $r = -0.74$, для Ni $r = -0.85$ и для Fe $r = -0.84$ при $p < 0.05$). Количество Cu, Mn, Zn, Fe и Ni в черноземе южном на территории плодового агроценоза соответствует региональным нормам и не выходит за рамки предельно допустимых концентраций.

Ключевые слова: чернозем южный; микроэлементы; агрохимические показатели; черешня; плодовой агроценоз.

Content of trace elements in calcic chernozem of fruit agrocenosis

© 2025 A. V. Kucherenko*, O. A. Biryukova**

*Southern Federal University,
Academy of Biology and Biotechnologies named after D. I. Ivanovsky,
194/1 Stachki Ave., Rostov-on-Don 344080, Russian Federation,*

*<https://orcid.org/0000-0003-4759-7185>, e-mail: alkucherenko@bk.ru,

**<https://orcid.org/0000-0001-9748-3296>, e-mail: oabirukova@sfedu.ru.

Received 11.11.2024, Revised 13.02.2025, Accepted 03.06.2025

Abstract: Sustainable functioning of fruit agrocenoses and obtaining ecologically clean products are impossible without assessing the microelement content in soils. The paper presents the results of studying the content and distribution of copper, manganese, zinc, iron and nickel in calcic chernozem under cherry (*Prunus avium* L.) cultivated in the southern horticultural zone of the Rostov region. Soil samples were collected from the following layers: 0–20, 20–40, 40–60, 60–80, 80–100 cm. The accumulative type of profile distribution with the greatest concentration in the humus-accumulative horizon 0–40 cm was established for all the elements under consideration. The stocks of trace elements in the metre layer of soil were determined. According to content levels Cu, Mn, Zn, Fe and Ni can be arranged in the following decreasing series: gross content – Fe > Mn > Zn > Ni > Cu, mobile forms – Mn > Fe > Cu > Ni > Zn. The share of mobile Cu, Zn, Ni, Fe from their total content in all layers of calcic chernozem is very low and vary from 0.02 to 0.45%, for Mn – from 1.67 to 2.04%. It was revealed that the carbonate content is one of the key factors determining the mobility of trace elements in calcic chernozem. An inverse correlation has been established between the studied mobile compounds of trace elements and the amount of carbonates

(for Cu $r = -0.88$, for Mn $r = -0.85$, for Zn $r = -0.74$, for Ni $r = -0.85$ and for Fe $r = -0.84$ at $p < 0.05$). The amount of copper, manganese, zinc, iron and nickel in calcic chernozem in fruit agrocenosis corresponds to regional norms and does not exceed the maximum permissible concentrations.

Keywords: calcic chernozem; trace element; soil fertility parameter; cherry; fruit agrocenosis.

ВВЕДЕНИЕ

Возделывание плодовых культур на юге России играет важную роль в экономике страны и обеспечивает ее продовольственную безопасность. По данным Министерства сельского хозяйства и продовольствия Ростовской области, урожай косточковых культур (черешня, вишня, сливы, абрикосы) на Дону в 2022 г. более чем в два раза превысил показатели 2021 г. и составил 4 100 т (Зональные системы земледелия..., 2022). Черешня представляет собой значимую плодовую культуру в сельском хозяйстве благодаря своей способности приносить высокие урожаи на протяжении многих лет. Плоды содержат множество полезных витаминов и биологически активных соединений, таких как легкоусвояемые сахара, органические кислоты, пектиновые, дубильные и минеральные вещества, что делает их ценным источником питательных веществ (Абызова, 2009; Берлова, 2020).

Создание высокопродуктивных, ресурсоэнергоёмких и экологически устойчивых садовых агроценозов требует учета всех почвенных характеристик. Существуют общепринятые критерии для оценки пригодности почвы для сада, в которых учитывается мощность рыхлого слоя, гранулометрический состав, физическое состояние, реакция среды (pH), содержание солей, солонцеватость, глубина залегания грунтовых вод и прочие факторы (Бузоверов и др., 2017; Котельникова, 2021; Методические указания..., 2003; Черников, 2015). В связи с этим становится очевидной потребность в тщательном исследовании элементного состава почвы. Важность изучения содержания микроэлементов, особенно их подвижных соединений, имеет решающее значение для понимания процессов их биодоступности, потенциальной токсичности и воздействия на окружающую среду в сельскохозяйственных районах, подверженных интенсивной антропогенной нагрузке. Это

важно также для регулирования биологических процессов растений и обеспечения высокой и стабильной урожайности.

К микроэлементам, необходимым всем высшим растениям, относятся медь (Cu), марганец (Mn), цинк (Zn), железо (Fe) и никель (Ni). Они участвуют практически во всех метаболических и клеточных функциях: энергетический обмен, первичный и вторичный метаболизм, фотосинтез, защита клеток, стабилизация дыхания, передача сигналов и размножение. Содержание и миграционная активность микроэлементов определяется типом почвы, характером материнских пород и растительности, микробиологической активностью почвы, реакцией среды, содержанием органического вещества и другими геохимическими барьерами (Горбунова, Протасова, 2008; Михайлова, 2019; Зонн, 1982; Kabata-Pendias, 2011).

Оптимальный диапазон содержания микроэлементов по сравнению с макроэлементами невелик, так как незначительный избыток или дефицит может привести к снижению урожайности. В садоводстве недостаток меди, марганца, цинка, железа и никеля часто становится причиной возникновения суховершинности (экзантемы), межжилкового хлороза молодых листьев и других физиологических заболеваний, а также задержки роста и цветения растений, уменьшения размера плодов, что приводит к снижению урожайности. При этом избыточное содержание указанных микроэлементов, способных накапливаться в результате продолжительного использования минеральных удобрений и средств защиты растений в условиях монокультуры, также способно оказывать негативное влияние на получаемую продукцию и здоровье человека. Поэтому все более актуальным становится изучение микроэлементов, которые во многом определяют качество и количество получаемой продукции (Водяницкий, 2003; Гуляева, 2022; Жизневская, 1961; Протасова, Щербаков, 2003).

Цель исследования заключается в изучении валового содержания и подвижных соединений меди, марганца, цинка, железа и никеля по профилю чернозема южного при возделывании черешни.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводились на базе сельскохозяйственного предприятия ОАО “Янтарное”, которое расположено в Мартыновском районе Ростовской области, в южной зоне садоводства региона (рис. 1). По условиям влагообеспеченности территория исследования относится к “очень засушливому” агроклиматическому району с гидротермическим коэффициентом (ГТК) менее 0.7 и годовым количеством осадков менее 400 мм. По теплообеспеченности теплого периода года регион классифицируется как умеренно жаркий, с суммой активных температур выше 10 °С в пределах 3 200–3 400 °С. Зима характеризуется как умеренно холодная, поскольку средний годовой минимум температуры воздуха составляет ниже 25 °С, а средний абсолютный минимум температуры на глубине залегания узла кущения озимых колеблется ниже 10 °С (Зональные системы земледелия..., 2022).

Почвенный покров территории исследования представлен черноземом южным среднесильным тяжелосуглинистым на лёссовидном суглинке, или Calcic Chernozems в соответствии с Международной классификацией почв (World Reference Base..., 2022). Средневзвешенное содержание органического вещества в гумусово-аккумулятивном слое (0–60 см) соответствует низкому уровню. Реакция почвенной среды варьирует от нейтральной до слабощелочной в нижней части профиля (табл. 1). Содержание карбонатов в верхних горизонтах чернозема южного находится в пределах 2.12–7.40%, а на глубине 60–100 см колеблется от 9.52 до 9.68%. Вскипание от 10%-ной соляной кислоты наблюдалось с поверхности.

Возделывание черешни (*Cerasus avium*) на исследуемых участках ведется на протяжении 20 лет. Сорт черешни Лапинс – сильнорослый самоплодный крупный. Плодоношение имеет среднепоздний характер (с середины июня и до конца июля) (Зайнутдинов и др., 2022; Колесникова, 2003). Согласно актам посадки, на одном га располагается 420 плодовых деревьев.

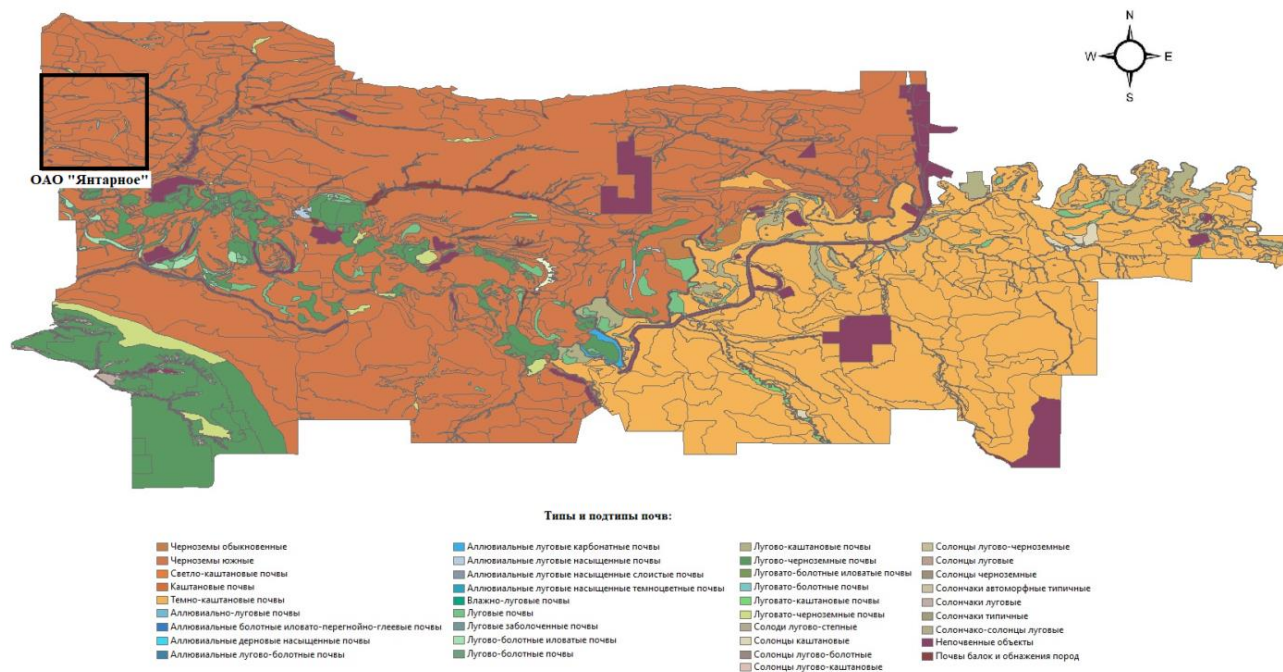


Рис. 1. Карта-схема почвенного покрова ОАО "Янтарное" Мартыновского района Ростовской области.
Fig. 1. Map-scheme of soil cover of JSC "Yantarnoye" Martynovsky district of Rostov region.

Таблица 1. Агрохимическая характеристика и гранулометрический состав чернозема южного плодового агроценоза

Table 1. Agrochemical characteristics and granulometric composition of calcic chernozem in fruit agrocenosis

Слой, см	pH_{H_2O}	$C_{орг}, \%$	$CaCO_3, \%$	Содержание фракций (размер частиц, мм), %	
				< 0.01	< 0.001
0–20	7.1 ± 0.1	2.1 ± 0.4	2.12 ± 0.3	34.9	17.1
20–40	7.3 ± 0.1	2.0 ± 0.4	2.09 ± 0.3	34.1	16.9
40–60	7.3 ± 0.1	1.9 ± 0.4	7.40 ± 1.0	29.5	21.5
60–80	7.5 ± 0.1	1.8 ± 0.4	9.52 ± 1.3	28.7	21.3
80–100	7.7 ± 0.1	1.8 ± 0.4	9.68 ± 1.3	24.5	28.5

Для боронования, дискования, культивации, пахоты, опрыскивания насаждений, внесения удобрений применяли гусеничные тракторы класса 2-3 Т-54В, Т-74 и ДТ-75, а для более легких работ по уходу за садами и перевозок – колесные тракторы МТЗ-80, МТЗ-82.

В начале мая проводили совместную обработку фунгицидом “Раек” (действующее вещество (д. в.): дифеноконазол) и инсектицидом “Кунгфу” (д. в.: лямбда-цигалотрин) с нормой расхода препаратов 0.2 и 0.4 л/га соответственно, а в конце месяца – фунгицидом “Грануфло” (д. в.: тиаметоксам) с инсектицидом “Кунгфу Супер” (д. в.: тиаметоксам + лямбда-цигалотрин) согласно регламентам применения: 2.0 кг/га и 0.15 л/га соответственно. На стадии бутонизации – начала цветения применяли листовую обработку “Новалоном” (19–19–19 + 2MgO + МЭ (Mn 0.035%, Cu 0.015%, Mo 0.002%, S 1.5%, Fe 0.08%, Zn 0.035%, B 0.02%)) в дозе 2 кг/га.

Исследуемая территория характеризуется однородным почвенным покровом, поэтому для репрезентативности отобранных проб на двух производственных участках общей площадью около 17.7 га было выделено четыре элементарных участка, каждый по 4.5 га, на которых заложили почвенные разрезы. Отбор образцов по слоям (0–20, 20–40, 40–60, 60–80, 80–100 см) был проведен согласно ГОСТ Р 58595–2019 и “Методическим указаниям по проведению комплексного мониторинга плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения”. Общее содержание меди, марганца, цинка, железа, никеля определяли с помощью рентгенофлуоресцентного анализа на приборе “Спектроскан МАКС – GV” (Методические указания..., 1992). Определение содержания подвижных соединений микроэлементов проводилось атомно-абсорбционным способом после их извлечения ацетатно-аммонийным буферным раствором с pH 4.8 (Минеев и др., 2001). Органическое вещество определяли в соответствии с ГОСТ 26213–2021; pH водной вытяжки – ГОСТ 26423–85. Плотность сложения почв определяли буровым методом, количество карбонатов – объемным методом с помощью кальциметра Шейблера (Безуглова, Морозов, 1987). Гранулометрический состав – методом пипетки (Вадюнина, Корчагина, 1986).

Средневзвешенное содержание органического вещества в

гумусово-аккумулятивном слое (0–60 см) определяли по формуле:

$$C_{\text{орг. средневзв. \%}} = \frac{(a_1 \cdot 20) + (a_2 \cdot 20) + (a_3 \cdot 20)}{60},$$

где $a_{1,2,3}$ – содержание органического вещества в слоях почвы 0–20, 20–40, 40–60 см соответственно, %; 60 – мощность гумусово-аккумулятивного слоя, см.

Для изучения процесса накопления и перемещения микро-элементов по профилю чернозема южного рассчитывали коэффициент радиальной дифференциации по формуле (Глазовская, 1988; Ковальчик и др., 2017):

$$R = \frac{C_{\text{в.г.}}}{C_{\text{н.г.}}},$$

где $C_{\text{в.г.}}$ – количество элемента в верхнем горизонте, мг/кг; $C_{\text{н.г.}}$ – количество элемента в нижнем слое почвы, мг/кг. При $R > 1$ элемент накапливается в верхнем слое почвы, если же $R < 1$, то происходит его вынос.

Для определения степени контрастности радиальной дифференциации использовали градацию, предложенную И.А. Авессаломовой (2012). Если $R > 1$: слабая (1–1.5), средняя (1.5–5.0), сильная (> 5.0). При $R < 1$ слабая контрастность соответствует значениям 1–0.5, средняя – < 0.5 .

Запасы микроэлементов (ЗМЭ) в черноземе южном рассчитывались по формуле (Асылбаев, 2015; Корчагина и др., 2014):

$$\text{ЗМЭ} \left(\frac{\text{кг}}{\text{га}} \right) = \frac{a \cdot h \cdot d \cdot 10^7}{10^6} = a \cdot h \cdot d \cdot 10,$$

где a – содержание элемента в слое почвы, мг/кг; h – глубина слоя, м; d – плотность почвы, г/см³; 10^7 – коэффициент пересчета массы слоя почвы 1 га в кг; 10^6 – коэффициент пересчета мг в кг.

Согласно ГОСТ Р 70281-2022, цинк относится к химическим веществам 1-го класса опасности, медь и никель – 2-го, марганец – 3-го. В качестве ориентира для оценки загрязнения почвы валовыми и подвижными соединениями этих элементов использовали предельно допустимые концентрации (ПДК), утвержденные Сан-ПиН 1.2.3685–21.

В связи с продолжительным возделыванием черешни в условиях монокультуры, использованием на протяжении долгих лет минеральных удобрений и средств защиты растений возникает необходимость в эколого-геохимической оценке состояния почвы, которая учитывает коэффициент концентрации химического вещества (K_c) и суммарный показатель загрязнения (Z_c). K_c определяется как отношение фактического содержания i -го химического элемента (C_i) в почвенной пробе к его фоновой концентрации (C_{fi}) (Ковальчик и др., 2017; Шацкая и др., 2020). Фоновое содержание Cu, Mn и Zn взяты у В.А. Акимцева (1962), а Ni и Fe – у Е.И. Гончарука (1986).

По формуле Ю.Е. Саета определяли суммарный показатель загрязнения почвы (Ковальчик и др., 2017; Шацкая и др., 2020):

$$Z_c = K_c - (n - 1),$$

где K_c – сумма коэффициентов концентрации компонентов загрязнения; n – количество учитываемых загрязняющих веществ с $K_c > 1.0$.

Категорию суммарного загрязнения почв определяли по существующим параметрам: допустимая ($Z_c < 16$), умеренно опасная ($16 < Z_c < 32$), опасная ($32 < Z_c < 128$), чрезвычайно опасная ($Z_c > 128$) (Ковальчик и др., 2017; Корчагина и др., 2014; Гигиенические нормативы..., 2021; Шацкая и др., 2020).

Корреляционный анализ полученных результатов проводили в программе Microsoft Excel. Аппроксимация экспериментальных данных реализована путем построения диаграммы по исходным данным с последующим подбором подходящей аппроксимирующей функции (линии тренда) (Курзаева, 2016). Коэффициент детерминации позволяет оценить точность аппроксимации и может принимать значения от 0 до 1:

- если $R^2 \geq 0.95$, то это свидетельствует о высокой точности аппроксимации;

- при $0.75 \leq R^2 < 0.95$ аппроксимация оценивается как удовлетворительная, модель в целом адекватно описывает явление;

- если $0.5 \leq R^2 < 0.75$, это указывает на слабую аппроксимацию, в таком случае модель слабо описывает явление.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Общее содержание меди, марганца, цинка, никеля и железа в гумусово-аккумулятивном горизонте чернозема южного плодowego агроценоза составляло соответственно – 58.3, 803.5, 98.7, 64.3, 39 703 мг/кг (рис. 2). Вниз по профилю почвы происходит снижение количества этих элементов.

Согласно данным статистического анализа, коэффициент детерминации для валового никеля составляет 0.98 (рис. 2d), что указывает на высокую точность аппроксимации ($R^2 \geq 0.95$); для меди $R^2 = 0.94$ (рис. 2a), для марганца $R^2 = 0.88$ (рис. 2b), для цинка $R^2 = 0.91$ (рис. 2c), для железа $R^2 = 0.94$ (рис. 2e), что говорит об адекватном описании явления ($0.75 \leq R^2 < 0.95$).

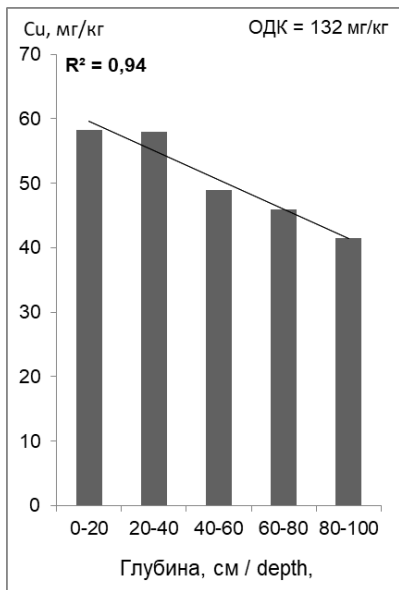
Вычисленные коэффициенты радиальной дифференциации, указывают на поверхностно-аккумулятивный тип профильного распределения при слабой степени контрастности (рис. 3) (Авес-саламова, 2012; Минкина и др., 2017).

Ресурсный подход в оценке качества почв позволяет оценить запасы микроэлементов в метровой толще почвы в расчете на единицу площади (Корчагина и др., 2014). Согласно полученным данным, чернозем южный обладает довольно высокими запасами валовых микроэлементов в слое почвы 0–100 см. По этому показателю их ряд накопления в черноземе южном плодowego агроценоза выглядит следующим образом: Fe > Mn > Zn > Ni > Cu (табл. 2).

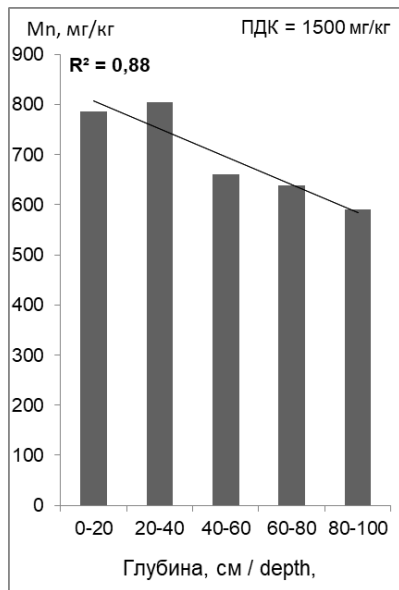
Таблица 2. Запасы валового содержания микроэлементов в черноземе южном плодowego агроценоза (0–100 см), кг/га

Table 2. Stocks of gross content of trace elements in calcic chernozem of fruit agrocnosis (0–100 cm), kg/ha

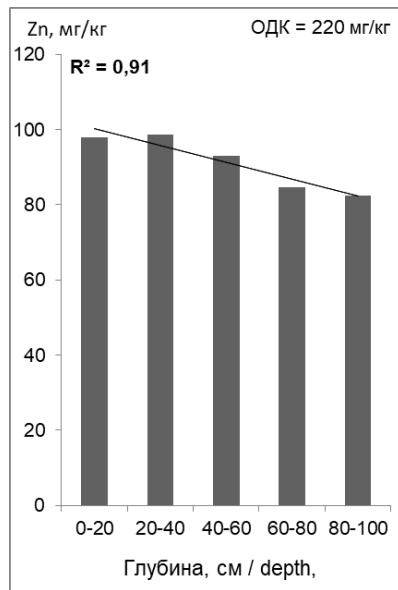
Cu	Ni	Zn	Fe	Mn
131.84	148.99	238.64	93194.87	1814.71



(a)



(b)



(c)

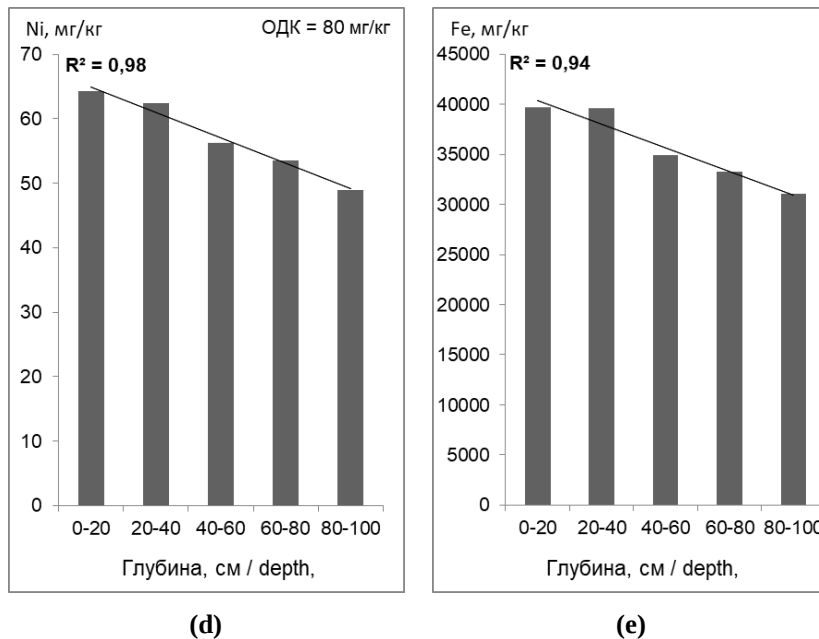


Рис. 2. Распределение валового содержания Cu (a), Mn (b), Zn (c), Ni (d), Fe (e) по профилю чернозема южного плодового агроценоза, мг/кг почвы.

Fig. 2. Distribution of gross content of Cu (a), Mn (b), Zn (c), Ni (d), Fe (e) in the profile of calcic chernozem in fruit agrocenosis, mg/kg of soil.

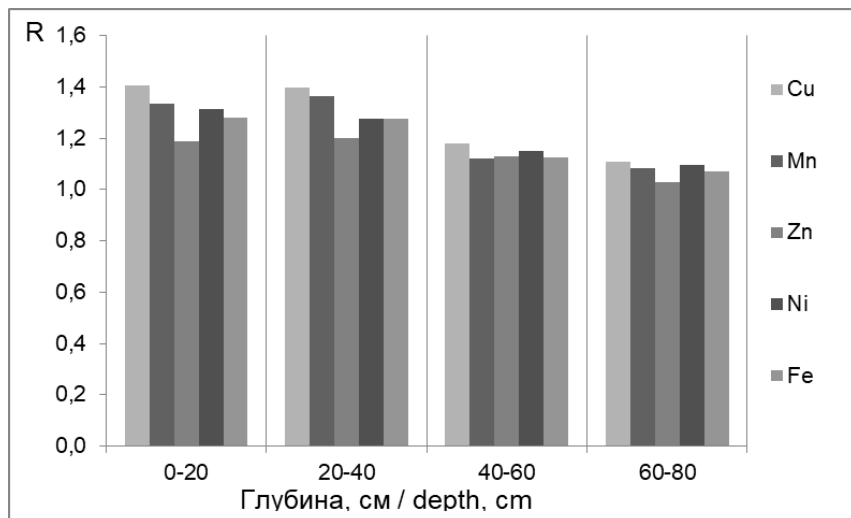


Рис. 3. Радиальная дифференциации общего содержания Cu, Mn, Zn, Ni, Fe по профилю чернозема южного.

Fig. 3. Radial differentiation of the gross content of Cu, Mn, Zn, Ni, Fe in the profile of calcic chernozem.

Тяжелые металлы в почве садовых агроценозов могут обнаруживаться не только из-за техногенного загрязнения. Причиной может быть длительное выращивание в условиях монокультуры, а также использование удобрений и средств защиты растений. В минеральных удобрениях тяжелые металлы присутствуют в качестве примесей. Больше всего ими обогащены фосфорные удобрения, в которых концентрация тяжелых металлов может достигать следующих значений: Mn – 2 942, Cu – 1 000, Zn – 3 000, Ni – 32, Fe – 1 650 мг/кг. Азотные и калийные удобрения в наибольших количествах имеют примеси Mn, Cu, Zn, Ni, Fe – до 1 000 мг/кг (Карпова, 2006; Санжарова и др., 2019). Для установления суммарного показателя загрязнения чернозема южного рассчитаны коэффициенты концентрации каждого элемента питания (табл. 3).

Таблица 3. Значения коэффициентов концентрации валового содержания микроэлементов в черноземе южном плодового агроценоза (0–100 см)

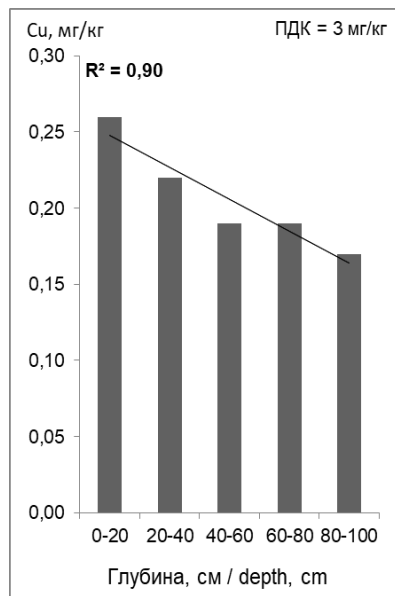
Table 3. Values of concentration coefficients of gross trace element content in calcic chernozem of fruit agrocenosis (0–100 cm)

Элемент	Коэффициент концентрации, K_c
Cu	1.69
Ni	1.43
Zn	1.40
Fe	0.94
Mn	0.82

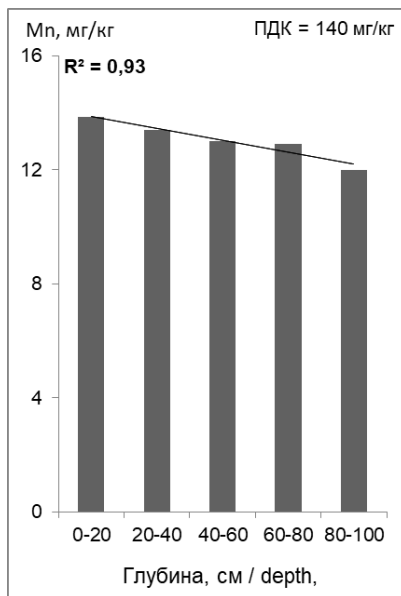
Наиболее надежной основой для научного расчета потребности возделываемых культур в микроудобрениях являются данные агрохимического обследования на содержание подвижных форм микроэлементов, поскольку именно они являются доступными для растений. Содержание меди снижается вниз по профилю на 35% – с 0.26 до 0.17 мг/кг (рис. 4а), марганца – на 13%, с 13.85 до 12.00 мг/кг (рис. 4б), цинка – на 67%, с 0.06 до 0.02 мг/кг (рис. 4с), никеля – на 80%, с 0.05 до 0.01 мг/кг (рис. 4д), железа – на 17%, с 9.50 до 7.92 мг/кг (рис. 4е). Значения коэффициента детерминации для подвижных соединений меди ($R^2 = 0.90$), марганца ($R^2 = 0.93$), цинка ($R^2 = 0.82$), никеля ($R^2 = 0.92$) и железа ($R^2 = 0.83$) свидетельствуют о том, что модель в целом адекватно описывает явление (рис. 4).

Коэффициенты радиальной дифференциации указывают на постепенное снижение содержания меди, марганца, никеля и железа вниз по профилю чернозема южного, что соответствует аккумулятивному типу профильного распределения (рис. 5).

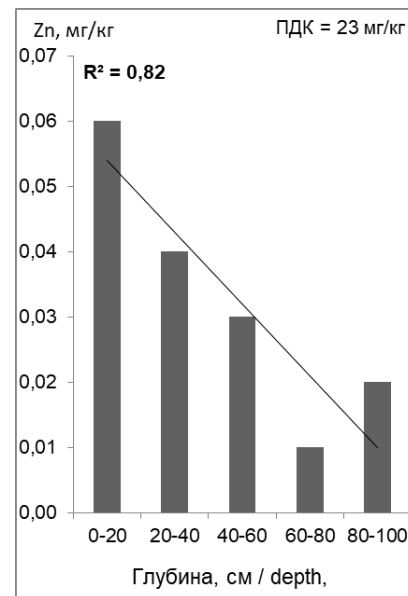
Расчет запасов микроэлементов в слое почвы мощностью 0–100 см дает возможность оценить их реальное количество и составить ряд накопления подвижных соединений изучаемых элементов питания в черноземе южном плодового агроценоза: $Mn > Fe > Cu > Ni = Zn$ (табл. 4).



(a)



(b)



(c)

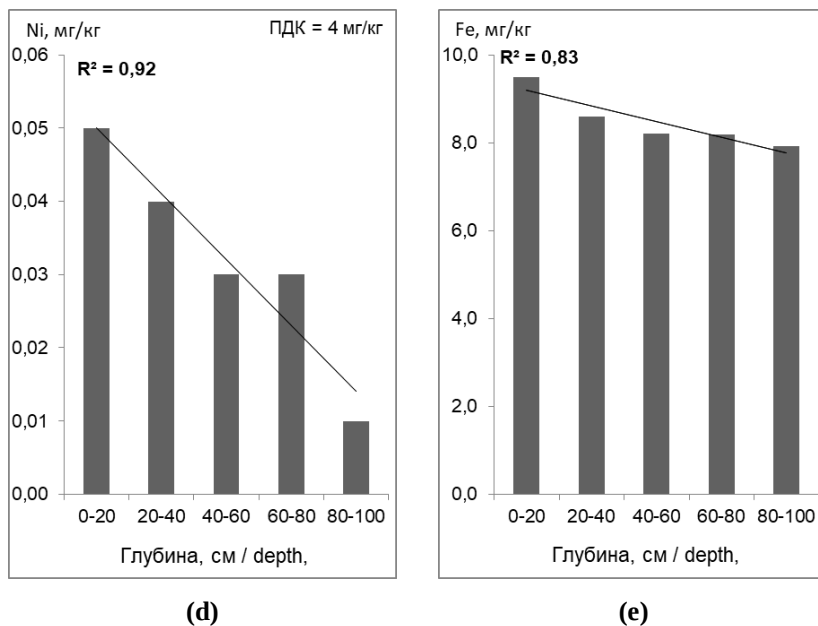


Рис. 4. Распределение подвижных соединений Cu (а), Mn (b), Zn (c), Ni (d), Fe (e) по профилю чернозема южного плодового агроценоза, мг/кг почвы.

Fig. 4. Distribution of mobile compounds Cu (a), Mn (b), Zn (c), Ni (d), Fe (e) in the profile of calcic chernozem of fruit agrocenosis, mg/kg of soil.

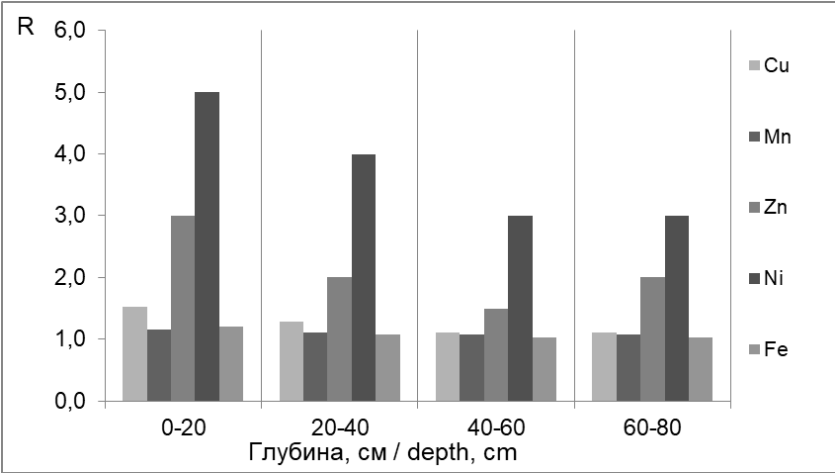


Рис. 5. Радиальная дифференциация подвижных Cu, Mn, Zn, Ni, Fe по профилю чернозема южного.

Fig. 5. Radial differentiation of mobile Cu, Mn, Zn, Ni, Fe compounds along the profile of calcic chernozem

Таблица 4. Запасы подвижных соединений микроэлементов в черноземе южном плодового агроценоза (0–100 см), кг/га.

Table 4. Stocks of mobile compounds of trace elements in calcic chernozem of fruit agrocenosis (0–100 cm), kg/ha.

Cu	Ni	Zn	Fe	Mn
0.54	0.08	0.08	22.20	34.09

Анализ показал обратную корреляцию между изучаемыми микроэлементами и количеством карбонатов: для меди $r = -0.88$, для марганца $r = -0.85$, для цинка $r = -0.74$, для никеля $r = -0.85$ и для железа $r = -0.84$ (при $p < 0.05$).

Накопление общего содержания меди, марганца, цинка, никеля и железа в слое 0–40 см отражает процесс биоаккумуляции, что является характерной чертой их распределения в почвенном профиле черноземов (рис. 2) (Жуйков, 2020; Лукин, Жуйков, 2021;

Medvedeva et al., 2022). Наряду с этим их прочному закреплению способствует высокое содержание органического вещества, тяжелый гранулометрический состав, сравнительно высокая емкость катионного обмена, а также присутствие глинистых минералов в почве. Аккумуляция исследуемых микроэлементов в верхней части почвенного профиля также свидетельствует о современном антропогенном влиянии (Кучеренко и др., 2021; Минкина и др., 2011; Kabata-Pendias, 2011; Zhao, Duo, 2002).

Коэффициенты радиальной дифференциации указывают на то, что общее содержание исследуемых биогенных микроэлементов уменьшается вниз по профилю чернозема южного. Наибольшее их накопление происходит в слое 0–40 см (рис. 3).

Суммарный показатель загрязнения чернозема южного плодородного агроценоза равен 2.5, что соответствует допустимой категории загрязнения почв ($Z_c < 16$). Превышений гигиенических нормативов по общему содержанию меди, марганца, цинка и никеля не обнаружено по всему профилю чернозема. Законодательно утвержденные предельно и ориентировочно допустимые концентрации как валового, так и подвижного железа в почвах отсутствуют. Кларк железа в почвах составляет 38 000 мг/кг (Гончарук, Сидоренко, 1986). По данным Д.С. Орлова (1985), А.Х. Шеуджена с соавт. (2015), валовое содержание железа в почвах колеблется в широких пределах – от 0.05 до 15%, в черноземах – около 3–6%, что соответствует значениям, полученным в ходе нашего исследования.

Для подвижных соединений изучаемых микроэлементов установлена тенденция постепенного снижения их содержания с увеличением глубины (с 0–20 до 80–100 см) (рис. 4). На аккумулятивный тип профильного распределения меди, марганца, никеля и железа в черноземе южном указывают коэффициенты радиальной дифференциации (рис. 5). Наименьшее количество микроэлементов обнаружено на глубине 60–80 см, где находится так называемый “щелочной барьер”. На уровне 80–100 см при дальнейшем увеличении щелочности почвенного раствора концентрация цинка возрастает из-за образования растворимых цинкатов (Кучеренко, 2023; Лукин, Жуйков, 2021). Как отмечают М.А. Глазовская (1988), Н.А. Протасова и А.П. Щербаков (2003, 2004), накопление

микроэлементов в верхних слоях почвы контролируется характером и положением геохимических барьеров, в роли которых в черноземных почвах выступают гумусовый и карбонатный горизонты, определяющие закономерности профильного распределения микроэлементов.

Исследуемая почва характеризуется средней обеспеченностью медью и марганцем: 0.21–0.50 и 11.0–20.0 мг/кг соответственно. Обеспеченность цинком остается низкой, составляя менее 2.0 мг/кг (Методические указания..., 2003). Такая ситуация может быть обусловлена значительным выносом этих микроэлементов из почвы, что происходит при отсутствии сбалансированного применения микроудобрений. Недостаточный уровень содержания доступного для растений цинка чаще всего проявляется на карбонатных почвах за счет образования $ZnCO_3$ (Самофалова, 2009; Baghdadi, Sadowski, 1998). Хотя никель и железо играют важную роль в минеральном питании растений, участвуя в ключевых физиологических и биохимических процессах, для этих элементов не существует отдельной классификации по обеспеченности почв. Разработка такой градации требует дальнейших исследований в системе “почва-растение”.

Ежегодно 8–10-летние деревья черешни поглощают элементы питания в количестве: Cu – 0.016 кг/га, Mn – 0.249, Zn – 0.074, Fe – 0.684 кг/га (Роева, 2018). Если на одном гектаре расположено 420 деревьев, то вынос микроэлементов составит: Cu – 6.7 кг/га, Mn – 104.6, Zn – 31.1, Fe – 287.3 кг/га, что свидетельствует о недостаточном количестве исследуемых микроэлементов в почве для получения стабильного и качественного урожая.

Доля подвижных Cu, Zn, Ni, Fe от их общего содержания во всех слоях чернозема южного низкая – от 0.02 до 0.45%, для Mn – от 1.67 до 2.04%. Из-за таких факторов, как высокое содержание гумуса, карбонатов, а также из-за щелочной реакции почвенного раствора и тяжелого гранулометрического состава подвижность микроэлементов в черноземе южном снижается (Кучеренко и др., 2021; Протасова, Щербаков, 2004).

Карбонаты способствуют накоплению микроэлементов в форме, которая трудно растворяется и малодоступна для растений. Это подтверждает обнаруженная обратная корреляционная связь

между исследуемыми микроэлементами и количеством карбонатов. Такие зависимости согласуются с работами других исследователей и могут объясняться как адсорбцией и осаждением, так и взаимодействием между этими элементами. Так, Д.В. Жуйков в своих работах (2019, 2020) связывает переход микроэлементов в труднодоступные для растений формы с высокой окарбоначенностью черноземов. Т.М. Минкина (2008) утверждает, что подвижность Cu и Zn обусловлена преимущественно соединениями металлов, удерживаемых карбонатами.

По всему профилю исследованного чернозема южного не обнаружены превышения гигиенических нормативов рассматриваемых микроэлементов, что указывает на безопасность использования данной почвы в сельском хозяйстве.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Содержание и распределение Cu, Mn, Zn, Ni и Fe в черноземе южном садового агроценоза характеризуется их активным накоплением в гумусово-аккумулятивных горизонтах, что свойственно почвам черноземного типа.

Коэффициенты радиальной дифференциации в профиле чернозема южного указывают на поверхностно-аккумулятивный тип накопления валового содержания Cu, Mn, Zn, Ni, Fe, характеризующийся слабой степенью контрастности. У подвижных соединений изучаемых микроэлементов степень контрастности различная: для Cu, Mn и Fe – слабая, для Zn и Ni – средняя, что обусловлено генетическими особенностями почвы и свойствами элементов.

Установлены ряды запаса микроэлементов в метровом слое почвы: для валового содержания – $Fe > Mn > Zn > Ni > Cu$, для подвижных соединений – $Mn > Fe > Cu > Ni > Zn$. Обеспеченность чернозема южного подвижными соединениями Cu и Mn – средняя, Zn – низкая. Это связано с их активным выносом в период формирования урожая черешни и указывает на необходимость внесения в почву микроудобрений.

Подтверждает значимость влияния карбонатов на подвижность микроэлементов в черноземе южном выявленная обратная корреляционная связь между содержанием исследуемых подвиж-

ных соединений микроэлементов и CaCO_3 : для меди $r = -0.88$, для марганца $r = -0.85$, для цинка $r = -0.74$, для никеля $r = -0.85$ и для железа $r = -0.84$ (при $p < 0.05$).

Суммарный показатель загрязнения валовыми Cu, Mn, Zn, Ni и Fe ($Z_c = 2.5$) свидетельствует об экологически чистом состоянии почвы плодового агроценоза, что позволяет получать безопасную и качественную продукцию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абызова А.А.* Хозяйственно-биологическая оценка сортов и форм вишни и черешни в условиях Центрально-Черноземного региона: Автореф. дис. ... к. с.-х. н.: 06.01.05. Мичуринск, 2009. 23 с.
2. *Авессаломова И.А.* Катенарная геохимическая организация таежных ландшафтов Восточно-Европейской равнины // Геохимия ландшафтов и география почв. 100 лет со дня рождения М.А. Глазовской. М.: АПР, 2012. С. 97–117.
3. *Акимцев В.В.* Содержание микроэлементов в почвах Ростовской области // Микроэлементы и естественная радиоактивность: материалы 3-го межвузовского совещания. Ростов н/Д: Изд-во Рост. ун-та, 1962. С. 38–41.
4. *Асылбаев И.Г.* Тяжелые металлы второго класса опасности в почвах и породах Южного Урала: запасы и оценка загрязнения // Плодородие. 2015. № 5. С. 58–63.
5. *Берлова Т.Н.* Степень изученности вопроса хозяйственно-ценных признаков черешни // Бюллетень Государственного Никитского ботанического сада. 2020. № 137. С. 112–117. DOI: <https://doi.org/10.36305/0513-1634-2020-137-112-117>.
6. *Бузоверов А.В., Дорошенко Т.Н., Рязанова Л.Г.* Южное плодоводство: почвенная агротехника, удобрение, орошение. СПб.: Лань, 2017. 128 с.
7. *Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А.* Методы исследования физических свойств почв. М.: Агропромиздат, 1986. 416 с.
8. *Водяницкий Ю.Н.* Химия и минералогия почвенного железа. М.: Почв. ин-т им. В. В. Докучаева, 2003. 236 с.
9. *Глазовская М.А.* Геохимия природных и техногенных ландшафтов. М.: Высшая школа, 1988. 328 с.
10. *Гончарук Е.И., Сидоренко Г.И.* Гигиеническое нормирование химических веществ в почве. М.: Медицина, 1986. 320 с.
11. *Горбунова Н.С., Протасова Н.А.* Формы соединений марганца, меди и цинка в черноземах Центрально-Черноземного региона // Вестник ВГУ.

2008. № 2. С. 77–85.

12. *Гуляева А.А.* Вишня и черешня. Орел: ФГБНУ ВНИИСПК, 2022. 86 с.

13. *Жизневская Г.Я.* Об эффективности совместного внесения молибдена и меди под сельскохозяйственные культуры // Микроэлементы и урожай. Рига, 1961. С. 77–104.

14. *Жуйков Д.В.* Мониторинг содержания марганца в агроценозах // Достижения науки и техники АПК. 2019. Т. 33. № 3. С. 19–22. DOI: <https://doi.org/10.24411/0235-2451-2019-10304>.

15. *Жуйков Д.В.* Мониторинг содержания микроэлементов (Mn, Zn, Co) в агроценозах юго-западной части Центрально-Черноземного района России // Земледелие. 2020. № 5. С. 9–13. DOI: <https://doi.org/10.24411/0044-3913-2020-10503>.

16. *Зайнутдинов З.З., Рязанова Л.Г., Дорошенко Т.Н., Гайченя М.И.* Оценка устойчивости сортов черешни к стресс-факторам южного региона России // Климат, экология, сельское хозяйство Евразии: материалы XI Международной науч.-практ. конф. Иркутск, 2022. С. 31–36.

17. *Зонн С.В.* Железо в почвах. М.: Наука, 1982. 208 с.

18. *Карпова Е.А.* Эколого-агрохимические аспекты длительного применения удобрений: состояние тяжелых металлов в агроэкосистемах: Автореф. дис. ... д. б. н.: 06.01.04. Москва, 2006. 48 с.

19. *Ковальчик Н.В., Смыкович Л.И., Карпиченко А.А.* Распространенность и виды миграции химических элементов. Минск: БГУ, 2017. 111 с.

20. *Колесникова А.Ф.* Вишня, черешня. Харьков: Фолио; М.: АСТ, 2003. 255 с.

21. *Корчагина К.В., Смагин А.В., Решетина Т.В.* Оценка техногенного загрязнения городских почв на основе профильного распределения тяжелых металлов и плотности сложения // Почвоведение. 2014. № 8. С. 988–997. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0032180X14080085>.

22. *Котельникова О.Б.* Проблемы садового агроценоза в условиях климатических изменений // Биотехнологические приемы производства и переработки сельскохозяйственной продукции: материалы Всероссийской (национальной) науч.-практ. конф. Курск, 2021. Ч. 2. С. 56–60.

23. *Курзаева Л.В.* Регрессионный анализ в электронных таблицах // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2016. Т. 12. № 7. С. 1234–1238.

24. *Кучеренко А.В., Бирюкова О.А.* Цинк в черноземе южном в условиях плодового агроценоза // II Никитинские чтения “Актуальные проблемы почвоведения, агрохимии и экологии в природных и антропогенных ландшафтах”: материалы Международной науч. конф. Пермь, 2023.

С. 196–202.

25. Кучеренко А.В., Бирюкова О.А., Кучменко Е.В. Содержание и распределение Mn в черноземе южном при возделывании различных сельскохозяйственных культур // Живые и биокосные системы. 2021. № 36. DOI: <https://doi.org/10.1822/2308-9709-2021-36-1>.

26. Кучеренко А.В., Бирюкова О.А., Медведева А.М., Минкина Т.М., Шерстнев А.К. Содержание и распределение Mn, Zn и Cu в черноземе южном // Актуальные проблемы экологии и природопользования: сб. науч. трудов XXII Международной науч.-практ. конф. М.: РУДН, 2021. С. 484–488.

27. Лукин С.В., Жуйков Д.В. Мониторинг содержания марганца, цинка и меди в почвах и растениях Центрально-Черноземного района России // Почвоведение. 2021. № 1. С. 60–69. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229321010099>.

28. Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства. М.: ЦИНАО, 1992. 61 с.

29. Методические указания по проведению комплексного мониторинга плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения. М.: ФГНУ “Росинформагротех”, 2003. 240 с.

30. Минеев В.Г., Сычев В.Г., Амелянчик О.А., Большева Т.Н., Гомонова Н.Ф., Дурынина Е.П., Егоров В.С., Егорова Е.В., Едемская Н.Л., Карпова Е.А., Прижукова В.Г. Практикум по агрохимии. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2001. 689 с.

31. Зональные системы земледелия в Ростовской области на 2022–2026 гг. Министерство сельского хозяйства и продовольствия Ростовской области. Ростов н/Д, 2022. 734 с.

32. Минкина Т.М. Соединения тяжелых металлов в почвах Нижнего Дона, их трансформация под влиянием природных и антропогенных факторов: Автореф. дис. ... д. б. н. Ростов н/Д, 2008. 49 с.

33. Минкина Т.М., Пинский Д.Л., Манджиева С.С., Антоненко Е.М., Сушкова С.Н. Влияние гранулометрического состава на поглощение меди, свинца и цинка черноземными почвами Ростовской области // Почвоведение. 2011. № 11. С. 1304–1311.

34. Минкина Т.М., Федоров Ю.А., Невидомская Д.Г., Польшина Т.Н., Манджиева С.С., Чаплыгин В.А. Тяжелые металлы в почвах и растениях устья реки Дон и побережья Таганрогского залива // Почвоведение. 2017. № 9. С. 1074–1089. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229317070067>.

35. Михайлова Л.А., Субботина М.Г., Алёшин М.А. Удобрение и диагностика минерального питания плодово-ягодных культур. Пермь: Минсельхоз РФ, Перм. гос. аграр.-тех. ун-т им. академика Д.Н. Прянишникова, 2019. 247 с.

36. Орлов Д.С. Химия почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1985. 376 с.
37. Санжарова Н.И., Цыгвинцев П.Н., Анисимов В.С., Гераськин С.А., Кузнецов В.К., Лой Н.Н., Пименов Е.П., Панов А.В., Ратников А.Н., Санжаров А.И., Гончарова Л.И., Свириденко Д.Г., Арышева С.П., Анисимова Л.Н., Дикарев А.В., Попова Г.И., Переволоцкая Т.В., Суслов А.А., Фригидова Л.М., Васильев Д.В., Курбаков Д.Н., Спиридонов С.И. Тяжелые металлы в агроценозах: миграция, действие, нормирование. Обнинск: Изд-во ФГБУ «ВНИИРАЭ», 2019. 398 с.
38. СанПин 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. 2021.
39. Безуглова О.С., Морозов И.В. Физико-химический анализ почв. Ростов н/Д: Изд-во Рост. ун-та, 1996. 40 с.
40. Протасова Н.А., Щербаков А.П. Особенности формирования микроэлементного состава зональных почв Центрального Черноземья // Почвоведение. 2004. № 1. С. 50–59.
41. Протасова Н.А., Щербаков А.П. Микроэлементы (Cr, V, Ni, Mn, Zn, Cu, Co, Ti, Zr, Ga, Be, Ba, Sr, B, I, Mo) в черноземах и серых лесных почвах Центрального Черноземья. Воронеж: Изд-во ВГУ, 2003. 368 с.
42. Роева Т.А. Минеральное питание как фактор продуктивности и качества плодов вишни, черешни // Современное садоводство. 2018. № 2. С. 48–69. DOI: <https://doi.org/10.24411/2312-6701-2018-10208>.
43. Самофалова И.А. Химический состав почв и почвообразующих пород. Пермь: Изд-во Перм. ГСХА, 2009. 132 с.
44. Черников Е.А. Оценка пригодности черноземов южных для создания продуктивных плодовых агроэкосистем // Научные труды Северо-Кавказского зонального научно-исследовательского института садоводства и виноградарства. 2015. Т. 7. С. 73–77.
45. Шацкая С.С., Красовская А.Ю., Сторожко И.В., Удальцов Е.А. Анализ содержания подвижных форм тяжелых металлов в почвах зоны влияния Новосибирского оловянного комбината // Химия в интересах устойчивого развития. 2020. Т. 28. № 5. С. 501–507. DOI: <https://doi.org/10.15372/KhUR20202560>.
46. Шеуджен А.Х., Бондарева Т.Н., Гуторова О.А. Содержание и состояние железа в черноземе выщелоченном Западного Предкавказья в условиях агрогенеза // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2015. № 107. С. 967–983.
47. Baghdadi M., Sadowski A. Estimation of nutrient requirements of sour cherry // Acta Hort. 1998. No. 468. P. 515–522. DOI: <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1998.468.64>.

48. IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4th ed. Vienna: International Union of Soil Sciences (IUSS), 2022. 234 p.
49. Kabata-Pendias A. Trace elements in soils and plants. 4th ed. N.Y.: Taylor and Francis Group Publishers LLC, 2011. 505 p.
50. Medvedeva A.M., Biryukova O.A., Kucherenko A.V., Ilchenko Y.I., Minkina T.M., Mandzhieva S.S., Mazarji M. The effect of resource-saving tillage technologies on the mobility, distribution and migration of trace elements in soil // Environmental Geochemistry and Health. 2022. Vol. 45. P. 85–100. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10653-021-01193-6>.
51. Zhao S.-L., Duo L.-A. Initial growth effect and ecological threshold of *Festuca arundinacea* L. under progressive stress of Cu^{2+} and Zn^{2+} // Acta Ecologica Sinica. 2002. Vol. 22(7). P. 1098–1105.

REFERENCES

1. Abyzova A.A., Khozyaistvenno-biologicheskaya otsenka sortov i form vishni i chereshni v usloviyakh Tsentral'no-Chernozemnogo regiona: Avtoref. dis. ... k. s.-kh. n. (Economic and biological evaluation of varieties and forms of cherry under the conditions of the Central Black Earth Region, Extended abstract of Cand. Agri. Sci. thesis), Michurinsk, 2009, 23 p.
2. Avessalomova I.A., Katenarnaya geokhimicheskaya organizatsiya taezhnykh landshaftov Vostochno-Evropeiskoi ravniny (Catenary geochemical organisation of taiga landscapes of the East European Plain), In: *Geokhimiya landshaftov i geografiya pochv. 100 let so dnya rozhdeniya M.A. Glazovskoi* (Geochemistry of landscapes and geography of soils. 100 years since the birth of M.A. Glazovskaya), Moscow: APR, 2012, pp. 97–117.
3. Akimtsev V.V., Soderzhanie mikroelementov v pochvakh Rostovskoi oblasti (Content of trace elements in soils of Rostov region), *Mikroelementy i estestvennaya radioaktivnost': materialy 3-go mezhvuzovskogo soveshchaniya* (Microelements and natural radioactivity: Proc. 3rd interuniversity meeting), Rostov-na-Donu: Izd-vo Rost. un-ta, 1962, pp. 38–41.
4. Asylbaev I.G., Tyazhelye metally vtorogo klassa opasnosti v pochvakh i porodakh Yuzhnogo Urala: zapasy i otsenka zagryazneniya (Heavy metals of the second hazard class in soils and rocks of the Southern Urals: reserves and pollution assessment), *Plodородие*, 2015, No. 5, pp. 58–63.
5. Berlova T.N., Stepen' izuchennosti voprosa khozyaistvenno-tsennykh priznakov chereshni (Extent of study of the issue of economically valuable traits of sweet cherries), *Byulleten' Gosudarstvennogo Nikitskogo botanicheskogo sada*, 2020, No. 137, pp. 112–117, DOI:

<https://doi.org/10.36305/0513-1634-2020-137-112-117>.

6. Buzoverov A.V., Doroshenko T.N., Ryazanova L.G., *Yuzhnoe plodovodstvo: pochvennaya agrotehnika, udobrenie, oroshenie* (Southern fruit growing: soil agronomy, fertilisation, irrigation), Saint-Petersburg: Lan', 2017, 128 p.
7. Vadyunina A.F., Korchagina Z.A., *Metody issledovaniya fizicheskikh svoystv pochv* (Methods of research of physical properties of soils), Moscow: Agropromizdat, 1986, 416 p.
8. Vodyanitskii Yu.N., *Khimiya i mineralogiya pochvennogo zheleza* (Chemistry and mineralogy of soil iron), Moscow: Pochv. in-t im. V. V. Dokuchaeva, 2003, 236 p.
9. Glazovskaya M.A., *Geokhimiya prirodnkh i tekhnogennykh landshaftov* (Geochemistry of natural and anthropogenic landscapes), Moscow: Vysshaya shkola, 1988, 328 p.
10. Goncharuk E.I., Sidorenko G.I., *Gigienicheskoe normirovanie khimicheskikh veshchestv v pochve* (Hygienic rationing of chemical substances in soil), Moscow: Meditsina, 1986, 320 p.
11. Gorbunova N.S., Protasova N.A., *Formy soedinenii margantsa, medi i tsinka v chernozemakh Tsentral'no-Chernozemnogo regiona* (Forms of manganese, copper and zinc compounds in chernozems of the Central Chernozem region), *Vestnik VGU*, 2008, No. 2, pp. 77–85.
12. Gulyaeva A.A., *Vishnya i chereshnya* (Cherry and sweet cherry), Orel: FGBNU VNIISPK, 2022, 86 p.
13. Zhiznevskaya G.Ya., *Ob effektivnosti sovmestnogo vneseniya molibdena i medi pod sel'skokhozyaistvennyye kul'tury* (On the effectiveness of joint application of molybdenum and copper for agricultural crops), *Mikroelementy i urozhai*, Riga, 1961, pp. 77–104.
14. Zhuikov D.V., *Monitoring sodержaniya margantsa v agrotsenozakh* (Monitoring of manganese content in agroecosystems), *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*, 2019, Vol. 33, No. 3, pp. 19–22, DOI: <https://doi.org/10.24411/0235-2451-2019-10304>.
15. Zhuikov D.V., *Monitoring sodержaniya mikroelementov (Mn, Zn, Co) v agrotsenozakh yugo-zapadnoi chasti Tsentral'no-Chernozemnogo raiona Rossii* (Monitoring of the content of trace elements (Mn, Zn, Co) in agroecosystems of the south-western part of the Central Chernozem region of Russia), *Zemledelie*, 2020, No. 5, pp. 9–13, DOI: <https://doi.org/10.24411/0044-3913-2020-10503>.
16. Zainutdinov Z.Z., Ryazanova L.G., Doroshenko T.N., Gaichenya M.I., *Otsenka ustoichivosti sortov chereshni k stress-faktoram yuzhnogo regiona Rossii* (Evaluation of resistance of cherry varieties to stress factors in the southern region of Russia), *Klimat, ekologiya, sel'skoe khozyaistvo Evrazii*

(Climate, ecology, agriculture of Eurasia), Proc. 11th Int. Sci. and Pract. Conf., Irkutsk, 2022, pp. 31–36.

17. Zonn S.V., *Zhelezo v pochvakh* (Iron in soils), Moscow: Nauka, 1982, 208 p.

18. Karpova E.A., *Ekologo-agrokhimicheskie aspekty dlitel'nogo primeneniya udobrenii: sostoyanie tyazhelykh metallov v agroekosistemakh: Avtoref. dis. ... dokt. biol. nauk* (Ecological and agrochemical aspects of long-term application of fertilisers: the state of heavy metals in agroecosystems, Extended abstract of Dr. Biol. Sci. thesis), Moscow, 2006, 48 p.

19. Koval'chik N.V., Smykovich L.I., Karpichenko A.A., *Rasprostranennost' i vidy migratsii khimicheskikh elementov* (Prevalence and types of migration of chemical elements), Minsk: BGU, 2017, 111 p.

20. Kolesnikova A.F., *Vishnya, chereshnya* (Cherry, sweet cherry), Khar'kov: Folio, 2003, 255 p.

21. Korchagina K.V., Smagin A.V., Reshetina T.V., Otsenka tekhnogennoho zagryazneniya gorodskikh pochv na osnove profil'nogo raspredeleniya tyazhelykh metallov i plotnosti slozheniya (Assessment of technogenic pollution of urban soils based on the profile distribution of heavy metals and density of composition), *Pochvovedenie*, 2014, No. 8, pp. 988–997, DOI: <https://doi.org/10.7868/S0032180X14080085>.

22. Kotel'nikova O.B., *Problemy sadovogo agrotsenoza v usloviyakh klimaticheskikh izmenenii* (Problems of garden agrocenosis in the conditions of climatic changes), *Biotehnologicheskie priemy proizvodstva i pererabotki sel'skokhozyaistvennoi produktsii* (Biotechnological methods of production and processing of agricultural products), Proc. of the All-Russian (national) Sci. and Pract. Conf., Kursk, 2021, Vol. 2, pp. 56–60.

23. Kurzaeva L.V., *Regressionnyi analiz v elektronnykh tablitsakh* (Regression analysis in spreadsheets) *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy*, 2016, Vol. 12, No. 7, pp. 1234–1238.

24. Kucherenko A.V., Biryukova O.A., *Tsink v chernozeme yuzhnom v usloviyakh plodovogo agrotsenoza* (Zinc in southern chernozem in conditions of fruit agrocenosis), *Aktual'nye problemy pochvovedeniya, agrokhimii i ekologii v prirodnykh i antropogennykh landshaftakh* (Actual problems of soil science, agrochemistry and ecology in natural and anthropogenic landscapes), Proc. of the Int. Sci. Conf., Perm', 2023, pp. 196–202.

25. Kucherenko A.V., Biryukova O.A., Kuchmenko E.V., *Soderzhanie i raspredelenie Mn v chernozeme yuzhnom pri vozdeleyvanii razlichnykh sel'skokhozyaistvennykh kultur* (Mn content and distribution in the southern chernozem under cultivation of different crops), *Zhivye i biokosnye sistemy*, 2021, No. 36, DOI: <https://doi.org/10.1822/2308-9709-2021-36-1>.

26. Kucherenko A.V., Biryukova O.A., Medvedeva A.M., Minkina T.M.,

Sherstnev A.K., Soderzhanie i raspredelenie Mn, Zn i Cu v chernozeme yuzhnom (Content and distribution of Mn, Zn and Cu in southern chernozem), *Aktual'nye problemy ekologii i prirodopol'zovaniya* (Actual problems of ecology and nature management), Proc. of XXII Int. Sci. and Pract. Conf., Moscow: RUDN, 2021, pp. 484–488.

27. Lukin S.V., Zhuikov D.V., Monitoring soderzhaniya margantsa, tsinka i medi v pochvakh i rasteniyakh Tsentral'no-Chernozemnogo raiona Rossii (Monitoring of the Contents of Manganese, Zinc, and Copper in Soils and Plants of the Central Chernozemic Region of Russia), *Pochvovedenie*, 2021, No. 1, pp. 60–69, DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229321010099>.

28. *Metodicheskie ukazaniya po opredeleniyu tyazhelykh metallov v pochvakh sel'khozugodii i produktsii rastenievodstva* (Methodical instructions for determination of heavy metals in soils of agricultural lands and crop production), Moscow: TsINAO, 1992, 61 p.

29. *Metodicheskie ukazaniya po provedeniyu kompleksnogo monitoringa plodorodiya pochv zemel' sel'skokhozyaistvennogo naznacheniya* (Methodological guidelines for the comprehensive monitoring of soil fertility of agricultural land), Moscow: FGNU “Rosinformagrotekh”, 2003, 240 p.

30. Mineev V.G., Sychev V.G., Amel'yanchik O.A., Bolysheva T.N., Gomonova N.F., Durykina E.P., Egorov V.S., Egorova E.V., Edemskaya N.L., Karpova E.A., Prizhukova V.G., *Praktikum po agrokhimii* (Practicum on agrochemistry), Moscow: Izd-vo Mosk. un-ta, 2001, 689 p.

31. *Zonal'nye sistemy zemledeliya v Rostovskoi oblasti na 2022–2026 gg* (Zonal systems of farming in the Rostov region for 2022-2026), Ministerstvo sel'skogo khozyaistva i prodovol'stviya Rostovskoi oblasti, Rostov-na-Donu, 2022, 734 p.

32. Minkina T.M., *Soedineniya tyazhelykh metallov v pochvakh Nizhnego Dona, ikh transformatsiya pod vliyaniem prirodnikh i antropogennykh faktorov: Avtoref. dis. ... dokt. biol. nauk* (Heavy metal compounds in the soils of the Lower Don, their transformation under the influence of natural and anthropogenic factors: Extended abstract of Dr. Biol. Sci. thesis), Rostov-na-Donu, 2008, 49 p.

33. Minkina T.M., Pinskii D.L., Mandzhieva S.S., Antonenko E.M., Sushkova S.N., Vliyanie granulometricheskogo sostava na pogloshchenie medi, svintsa i tsinka chernozemnymi pochvami Rostovskoi oblasti (Influence of granulometric composition on the absorption of copper, lead and zinc by chernozem soils of the Rostov region), *Pochvovedenie*, 2011, No. 11, pp. 1304–1311.

34. Minkina T.M., Fedorov Yu.A., Nevidomskaya D.G., Pol'shina T.N., Mandzhieva S.S., Chaplygin V.A., Tyazhelye metally v pochvakh i rasteniyakh ust'ya reki Don i poberezh'ya Taganrogskogo zaliva (Heavy

metals in soils and plants of the don river estuary and the Taganrog Bay coast), *Pochvovedenie*, 2017, No. 9, pp. 1074–1089, DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229317070067>.

35. Mikhailova L.A., Subbotina M.G., Aleshin M.A., *Udobrenie i diagnostika mineral'nogo pitaniya plodovo-yagodnykh kul'tur* (Fertilisation and diagnostics of mineral nutrition of fruit and berry crops), Perm': Minsel'khov RF, Perm. gos. agrar.-tekhn. un-t im. akademika D.N. Pryanishnikova, 2019, 247 p.

36. Orlov D.S., *Khimiya pochv* (Chemistry of soils), Moscow: Izd-vo Mosk. un-ta, 1985, 376 p.

37. Sanzharova N.I., Tsygvintsev P.N., Anisimov V.S., Geras'kin S.A., Kuznetsov V.K., Loi N.N., Pimenov E.P., Panov A.V., Ratnikov A.N., Sanzharov A.I., Goncharova L.I., Sviridenko D.G., Arysheva S.P., Anisimova L.N., Dikarev A.V., Popova G.I., Perevolotskaya T.V., Suslov A.A., Frigidova L.M., Vasil'ev D.V., Kurbakov D.N., Spiridonov S.I., *Tyazhelye metally v agrotsenozakh: migratsiya, deistvie, normirovanie* (Heavy metals in agroecosystems: migration, action, rationing), Obninsk: Izd-vo FGBU "VNIIRAE", 2019, 398 p.

38. SanPin 1.2.3685-21. Hygienic norms and requirements for ensuring safety and (or) harmlessness of habitat factors for humans, 2021.

39. Bezuglova O.S., Morozov I.V., *Fiziko-khimicheskii analiz pochv* (Physico-chemical analysis of soils), Rostov-na-Donu: Izd-vo Rost. un-ta, 1996, 40 p.

40. Protasova N.A., Shcherbakov A.P., *Osobennosti formirovaniya mikroelementnogo sostava zonal'nykh pochv Tsentral'nogo Chernozem'ya* (Features of formation of microelement composition of zonal soils of the Central Black Earth Region), *Pochvovedenie*. 2004, No. 1, pp. 50–59.

41. Protasova N.A., Shcherbakov A.P., *Mikroelementy (Cr, V, Ni, Mn, Zn, Su, So, Ti, Zr, Ga, Be, Ba, Sr, V, I, Mo) v chernozemakh i serykh lesnykh pochvakh Tsentral'nogo Chernozem'ya* (Microelements (Cr, V, Ni, Mn, Zn, Cu, Co, Ti, Zr, Ga, Be, Ba, Sr, B, I, Mo) in chernozems and grey forest soils of the Central Black Earth Region), Voronezh: Izd-vo VGU, 2003, 368 p.

42. Roeva T.A., *Mineral'noe pitanie kak faktor produktivnosti i kachestva plodov vishni, chereshni* (Mineral nutrition as a factor of productivity and quality of fruits of cherry, sweet cherry), *Sovremennoe sadovodstvo*, 2018, No. 2, pp. 48–69, DOI: <https://doi.org/10.24411/2312-6701-2018-10208>.

43. Samofalova I.A., *Khimicheskii sostav pochv i pochvoobrazuyushchikh porod: ucheb. posobie* (Chemical composition of soils and soil-forming rocks: textbook), Perm': Izd-vo Perm. GSKhA, 2009, 132 p.

44. Chernikov E.A., *Otsenka prigodnosti chernozemov yuzhnykh dlya sozdaniya produktivnykh plodovykh agroekosistem* (Assessment of the suitability of southern chernozems for the creation of productive fruit

agroecosystems), *Nauchnye trudy Severo-Kavkazskogo zonal'nogo nauchno-issledovatel'skogo instituta sadovodstva i vinogradarstva*, 2015, Vol. 7, pp. 73–77.

45. Shatskaya S.S., Krasovskaya A.Yu., Storozhko I.V., Udaltsov E.A., Analiz soderzhaniya podvizhnykh form tyazhelykh metallov v pochvakh zony vliyaniya Novosibirskogo olovyannogo kombinata (Analysis of the content of mobile forms of heavy metals in soils of the zone of influence of the Novosibirsk tin smelter), *Khimiya v interesakh ustoychivogo razvitiya*, 2020, Vol. 28, No. 5, pp. 501–507, DOI: <https://doi.org/10.15372/KhUR20202560>.

46. Sheudzhen A.Kh., Bondareva T.N., Gutorova O.A., Soderzhanie i sostoyanie zheleza v chernozeme vyshchelochennom Zapadnogo Predkavkaz'ya v usloviyakh agrogeneza (Content and state of iron in chernozem leached chernozem of the Western Precaucasus under conditions of agrogenesis), *Politematicheskii setevoy elektronnyi nauchnyi zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2015, No. 107, pp. 967–983.

47. Baghdadi M., Sadowski A., Estimation of nutrient requirements of sour cherry, *Acta Hort.*, 1998, No. 468, pp. 515–522, DOI: <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1998.468.64>.

48. IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4th ed. Vienna: International Union of Soil Sciences (IUSS), 2022, 234 p.

49. Kabata-Pendias A., *Trace elements in soils and plants*. 4th ed., N.Y.: Taylor and Francis Group Publishers LLC, 2011, 505 p.

50. Medvedeva A.M., Biryukova O.A., Kucherenko A.V., Ilchenko Y.I., Minkina T.M., Mandzhieva S.S., Mazarji M., The effect of resource-saving tillage technologies on the mobility, distribution and migration of trace elements in soil, *Environmental Geochemistry and Health*, 2022, Vol. 45, pp. 85–100, DOI: <https://doi.org/10.1007/s10653-021-01193-6>.

51. Zhao S.-L., Duo L.-A., Initial growth effect and ecological threshold of *Festuca arundinacea* L. under progressive stress of Cu^{2+} and Zn^{2+} , *Acta Ecologica Sinica*, 2002, Vol. 22(7), pp. 1098–1105.

УДК 631.42

DOI: 10.19047/0136-1694-2025-123-179-212



Ссылки для цитирования:

Киндеев А.Л., Гутько Ф.С. Оптимизация севооборотов на основе геостатистического анализа кислотности почвы и данных дистанционного зондирования земель с учетом финансовых издержек // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2025. Вып. 123. С. 179-212. DOI: 10.19047/0136-1694-2025-123-179-212

Cite this article as:

Kindeev A.L., Gutko F.S., Optimization of crop rotations based on geostatistical analysis of soil acidity and earth remote sensing data, taking into account financial costs, Dokuchaev Soil Bulletin, 2025, V. 123, pp. 179-212, DOI: 10.19047/0136-1694-2025-123-179-212

Оптимизация севооборотов на основе геостатистического анализа кислотности почвы и данных дистанционного зондирования земель с учетом финансовых издержек

© 2025 г. А. Л. Киндеев *, Ф. С. Гутько **

*Факультет географии и геоинформатики БГУ, Республика Беларусь,
220030, Минск, ул. Ленинградская 16,*

** <https://orcid.org/0000-0003-2713-8184>, e-mail: AKIndeev@tut.by,
** <https://orcid.org/0009-0001-8161-2820>, e-mail: gytko.filip12@gmail.com.*

*Поступила в редакцию 08.09.2024, после доработки 08.10.2024,
принята к публикации 03.06.2025*

Резюме: В статье приводятся возможности детального анализа пространственного распределения кислотности почвы для снижения издержек на известкование и оптимизации землепользования пяти рабочих участков опытного крестьянского фермерского хозяйства “Гутько С.”. На основании вариограммного анализа определяются закономерности распределения кислотности на ключевых участках. Регрессионный анализ показал значимую и высокую полиномиальную зависимость между индексом NDVI и кислотностью почв (корреляционное отношение составляет 0.60–0.75 на ключах № 2–4) и значимую прямую линейную взаимосвязь на ключе № 1. Геостатистический анализ позволил выявить на участке № 3 среднюю

пространственную зависимость (остаточная дисперсия 29.9%). На основе сильной взаимосвязи между средними значениями индекса NDVI летних месяцев за 3 года (9 снимков) и кислотности почвы было предложено использовать NDVI в качестве предиктора для оптимизации сетки пробоотбора с использованием стохастического моделирования. Было установлено, что проявление взаимосвязи с NDVI больше на тех участках, где меньше выражена расчлененность рельефа. На основании расчетов затрат “франко-почва” для проведения известкования было обосновано преимущество детального учета кислотности перед классическими методами агрохимического обследования, применяемыми на территории Республики Беларусь. Прибыль за ротацию составила около 1 200 долларов США с площади 184,5 га. По результатам анализа распределения кислотности, индекса NDVI и истории полей была предложена более детальная схема элементарных участков с севооборотами, которые учитывают кислотность почвы. Ограничением для более дробной разбивки участков выступили возможности имеющейся сельскохозяйственной техники.

Ключевые слова: почвенный покров; агрохимическое обследование; неоднородность; вариограмма; вегетационный индекс; регрессионный анализ.

Optimization of crop rotations based on geostatistical analysis of soil acidity and earth remote sensing data, taking into account financial costs

© 2025 A. L. Kindeev*, F. S. Gytko**

*Faculty of Geography and Geoinformatics BSU,
16 Leningradskaya Str., Minsk 220030, Republic of Belarus,*

** <https://orcid.org/0000-0003-2713-8184>, e-mail: AKIndeev@tut.by,
** <https://orcid.org/0009-0001-8161-2820>, e-mail: gytko.filip12@gmail.com.*

Received 08.09.2024, Revised 08.10.2024, Accepted 03.06.2025

Abstract: The article presents the possibilities of detailed analysis of the spatial distribution of soil acidity to reduce liming costs and optimise land use in five working areas of the experimental farm “Gutko S.”. Based on variogram analysis, the patterns of acidity distribution in key areas are determined. Regression analysis showed a significant and high polynomial dependence between the NDVI index and soil acidity (the correlation ratio is 0.60–0.75 at sites No. 2–4) and a significant direct linear relationship at site

No. 1. Geostatistical analysis revealed an average spatial dependence (residual variance of 29.9%) at site No. 3. Based on the strong relationship between the average values of the NDVI index for the summer months over 3 years (9 images) and soil acidity, it was proposed to use NDVI as a predictor for optimising the sampling grid using stochastic modelling. It was found that the relationship with NDVI is more pronounced in areas where the relief is less fragmented. Based on calculations of costs for liming, the advantage of detailed acidity accounting over the classical methods of agrochemical survey used in the Republic of Belarus was substantiated. The profit per rotation was about 1,200 US dollars from an area of 184.5 ha. Based on the results of the analysis of acidity distribution, the NDVI index and field history, a more detailed scheme of elementary plots with crop rotations that take into account soil acidity was proposed. The limitations of the available agricultural equipment prevented a more detailed division of the plots.

Keywords: soil cover; agrochemical survey; heterogeneity; variogram; vegetation index; regression analysis.

ВВЕДЕНИЕ

Неоднородность почвенного покрова и его свойств до сих пор остается предметом многочисленных исследований и дискуссий. Основные геохимические процессы и закономерности перераспределения элементов в почве широко изучены в глобальных и региональных масштабах, однако при укрупнении масштаба исследований до отдельно взятого элементарного сельскохозяйственного участка или малой природно-территориальной единицы (урочища и/или фации) почвенные свойства подчиняются своим законам, которые изучены не до конца.

Учет неоднородного пространственного распределения почвенных свойств является главным ключом к получению высоких и стабильных урожаев и поддержанию продовольственной безопасности стран. Рост населения приводит к тому, что сельскохозяйственные земли, доступные для выращивания культур и животноводства, на душу населения сократились на 20 процентов за период с 2000 по 2017 гг. (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2021). Также, наряду с эрозией почв и засолением, загрязнение почв, вызванное чрезмерным или ненадлежащим использованием агрохимикатов, снижает количество продуктивных земель. С начала XXI в. объем общемирового производства хими-

катов удвоился и достиг примерно 2.3 млрд т, а к концу десятилетия, по прогнозам, он увеличится еще на 85% (Глобальное почвенное партнерство, 2022). Для предотвращения нерационального использования удобрений и пестицидов еще с прошлого века разрабатывались методики, позволяющие достигнуть необходимых результатов в оптимизации сельскохозяйственной деятельности, которые с успехом реализуются в технологиях точного земледелия (Raj et al., 2022). Основной гипотезой таких методик является представление почвенного покрова как набора континуально распределенных свойств и предположение о наличии существенного варьирования свойств почвенной среды даже на небольшом участке территории, что неоднократно доказывалось эмпирическими опытами в различных странах (Heuvelink et al., 2001; McBratney et al., 2019) и, в том числе, в Российской Федерации (Красильников и др., 2019; Самсонова и др., 2017; Якушев, 2013).

На основании проведенных исследований сформировалось отдельное научное направление в почвоведении и географии почв – педометрика (McBratney et al., 2018), одним из основных инструментов которой является геостатистика – научно-методический аппарат анализа данных, базирующийся на теории вероятности и позволяющий выразить случайное явление в пространстве и/или времени через математико-статистические величины. Геостатистический анализ позволяет не только с максимальной достоверностью картографировать почвенные свойства, но и изучать их пространственную структуру, что актуально для учета кислотности и других физико-химических свойств почв (Нурлыгаянов и др., 2021; Uwiragiye et al., 2023; Xiao et al., 2023).

Как для Беларуси, так и для России проблема подкисления почв остается одной из приоритетных. По расчетам площади кислых почв в Российской Федерации достигают 55–56 млн га, что связано с генетическими особенностями почвенного покрова, с климатом и интенсивностью сельскохозяйственного использования земель (Окорков, 2019; Шильников и др., 2008). За послереформенный период (1990–2019 гг.) доля кислых почв в пахотном фонде страны увеличилась на 2%, что связано с резким уменьшением площади известкования, восстановлением известкованных ранее генетически кислых почв, а также с возвратом в сельскохо-

зыйственный оборот части кислых почв, перелогов и залежей (Иванов и др., 2020). К началу XXI в. экономические условия функционирования сельского хозяйства в России сильно изменились, объемы выполняемых работ по химической мелиорации стали недостаточными (Агропромышленный комплекс России в 2019 году, 2020; Охрана окружающей среды в России, 2020). При необходимом ежегодном уровне известкования равном 7–8 млн га, фактический уровень составляет менее 5 % от требуемого (Бакина и др., 2014). Подобная ситуация отмечается и в Республике Беларусь – в 2004 г. доля сильно- и среднекислых почв с $pH_{KCl} < 5.0$ составляла всего 4.5% от общей площади пашни, а в 2020 г. – достигла 95% вследствие недостаточного известкования (Богдевич, 2023).

Предполагается, что выравнивание уровня кислотности почв возможно при использовании современных технологий, основанных на методах точного земледелия, данных дистанционного зондирования и геоинформационных систем.

Главным вопросом при переходе на детальных (внутрипольный) учет почвенных свойств, в том числе кислотности, заключается в целесообразности отбора большого количества образцов (около 100 проб с расстоянием не более 60–70 м (Hofman et al., 2021; Oliver et al., 2010). Проводимые ранее опыты на территории Беларуси на отдельно взятых полях показывали значительное снижение затрат “франко-почвы” по сравнению с установленным методом агрохимического обследования: с 5 611 до 2 807 долл. США для поля размером 106 га (Киндеев, 2022) и с 5 464 до 3 947 долл. США для 119 га (Воробей и др., 2024). Однако на сегодняшний день не определены ни вариограммы для отдельно взятых регионов и почвенных свойств, ни их характеристики, на основании которых возможно было бы экстраполировать результаты на другие сельскохозяйственные поля, что подразумевает необходимость накопления большого эмпирического материала.

Кроме этого, пока остается задача по определению оптимального места отбора проб – “закрытость” почвенного покрова не дает возможность создать репрезентативную сетку пробоотбора без знания о распределении свойств. Решением данной задачи может быть синтез геостатистических и дистанционных методов

изучения почвенного покрова. Согласно одному из правил геостатистики (Oliver et al., 2010), которое гласит, что, если существует связь между свойствами почв или сельскохозяйственными культурами и вспомогательными данными, вариограммы последних могут указывать приблизительный масштаб изменений в первых. Исходя из вышесказанного можно предположить, что если определить достоверную взаимосвязь между, например, данными дистанционного зондирования Земли и распределением показателей почвенных свойств, то можно разработать первичную сеть мониторинга, которая будет со значительной долей вероятности соответствовать распределению показателей изучаемого свойства.

Так, в Казахстане на площади 5 236 га был проведен отбор образцов почв по гектарной сетке (20 уколов на один смешанный образец) с последующим их анализом на содержание фосфора. Полученные лабораторные данные использовались для проверки модели прогнозирования содержания фосфора, основанной на методах машинного обучения, 9 спектральных каналах и 5 вегетационных индексах. Результаты моделирования показали точность до 71,8% (Бекбаева и др., 2020), что позволяет предполагать возможность построения предварительной сетки отбора проб по данным дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Также высокая регрессионная зависимость наблюдается между данными ДЗЗ с влажностью (Савин и др., 2021) и гумусом (Малышевский и др., 2013). Однако остаются другие свойства, которые проявляются на снимках не так явно, и для каждого из которых необходимо подбирать предикторы, которые будут иметь высокую и значимую регрессионную зависимость.

Указанные вопросы определяют актуальность настоящего исследования и требуют решения следующих задач:

- обосновать снижение экономических затрат на известкование при использовании геостатистики для детального учета кислотности почв;

- определить с помощью корреляционного и регрессионного анализа возможность использования данных ДЗЗ для разработки сетей пробоотбора для установления кислотности почв;

- предложить новые схемы севооборотов для опытного хозяйства с учетом внутрипольной неоднородности кислотности почв.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводилось на территории действующего крестьянско-фермерского хозяйства (КФХ) “Тутько С.” в 2023 г. в Барановичском районе Минской области Республики Беларусь (рис. 1). Значения NDVI были получены со снимков Landsat 8 (табл. 1), а цифровая почвенная карта составлена на основе районной почвенной карты масштаба 1 : 50 000.

Данная территория расположена в пределах Новогрудской возвышенности, которая входит в состав Западно-Белорусской подобласти Центрально-Белорусских возвышенностей и гряд. Новогрудская возвышенность представляет собой водораздел между неманским и минским потоками и характеризуется монолитностью очертаний и четкой ограниченностью глубокими речными долинами. В основном распространены красно-бурые моренные суглинки, супеси, часто рыхлые, сильно завалуненные, с россыпями галечно-валунного материала.

Важно отметить, что в Республике Беларусь дотации на известкование не выделяются частным фермерским хозяйствам, в связи с этим известкование проводилось только на ключевом участке № 1 в 2010 г., когда он принадлежал государственному сельскохозяйственно-промышленному комплексу.

На основании различий в площади пяти опытных участков была сгенерирована сетка пробоотбора в ArcGIS Pro с шагом в 70 м на участках № 1 и № 3, с шагом в 50 м на участке № 2, с шагом 40 м на участке № 4 и с шагом 20 м на участке № 5.

На опытном участке № 1 (99.1 га) было отобрано 198 почвенных образцов, на участке № 2 (19.5 га) – 82, на участке № 3 (50.2 га) – 105, № 4 (11.4 га) – 72 и № 5 (4.3 га) – 108. Суммарное количество точек составило 565. Отбор проб производился из слоя 0–20 см.

Значения pH_{KCl} были получены потенциометрическим методом в лаборатории, согласно ГОСТу 26484-85 (Метод определения обменной кислотности, 1985).

Таблица 1. Севообороты и дата съемки элементарных участков КФХ “Гутько С.”
Table 1. Crop rotations and date of survey of elementary plots of the peasant farm “Gutko S.”

Год		2021	2022	2023 (проведение исследования)	
Дата съемки Landsat 8		17 июня / 15 июля / 14 августа	12 июня / 17 июля / 24 августа	25 июня / 12 июля / 16 августа	
		Номер элементарного участка	Возделываемая культура		
Номер рабочего участка	1	1.1	пшеница	овес,	ячмень
		1.2	тритикале	многолетние травы	многолетние травы
		1.3	ячмень	кукуруза	ячмень
		1.4	многолетние травы	многолетние травы	многолетние травы
		1.5	гречиха	многолетние травы	многолетние травы
		1.6	овес	ячмень	пшеница
		1.7	овес	ячмень	пшеница
	2	2.8	ячмень	тритикале	овес
		2.9	гречиха	ячмень	пшеница
		2.10	гречиха	картофель	картофель

Продолжение таблицы 1
Table 1 continued

Год		2021	2022	2023 (проведение исследования)	
Дата съемки Landsat 8		17 июня / 15 июля / 14 августа	12 июня / 17 июля / 24 августа	25 июня / 12 июля / 16 августа	
		Номер элементарного участка	Возделываемая культура		
Номер рабочего участка	3	3.12	овес	ячмень,	тритикале
		3.14	ячмень	пшеница	овес
		3.15	пшеница	ячмень	тритикале
		3.16	овес	гречиха	тритикале
		3.17	ячмень	пшеница	ячмень
		3.18	гречиха	овес	гречиха
	4	4.13	ячмень	овес	гречиха
	5	5.11	тритикале	овес	гречиха

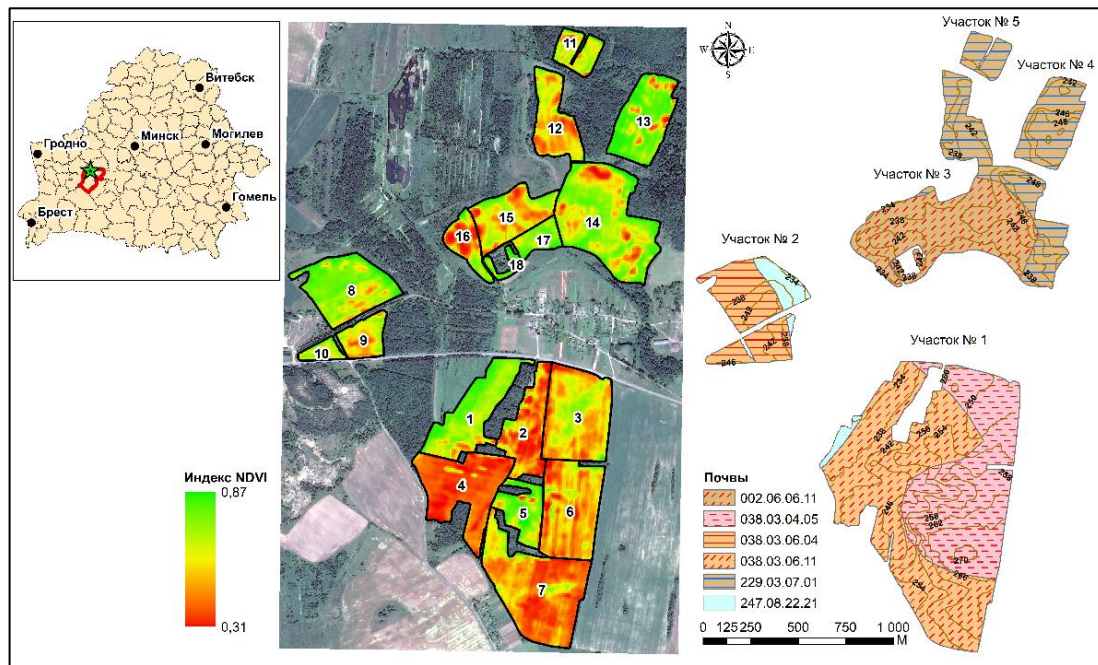


Рис. 1. Среднеарифметические значения вегетационного индекса NDVI и почвенная карта КФХ “Гутько С.” в Барановичском административном районе Республики Беларусь.
Fig. 1. Vegetation index NDVI and soil map of the farm “Gutko S.” in the Baranovichi administrative region of the Republic of Belarus.

Примечание. 002.06.06.11 – дерново-карбонатные, развивающиеся на рыхлых древнеаллювиальных супесях, постилающиеся мощными песками с 0.5–1.0 м; 038.03.04.05 – дерново-подзолистые среднеподзоленные, местами слабоэродированные, развивающиеся на рыхлых водно-ледниковых супесях, постилающиеся связными породами глубже 1.0 м; 038.03.06.04 – дерново-подзолистые среднеподзоленные, местами слабоэродированные, развивающиеся на рыхлых водно-ледниковых супесях, постилающиеся связными породами с 0.5–1.0 м; 038.03.06.11 – дерново-подзолистые среднеподзоленные, местами слабоэродированные, развивающиеся на рыхлых водно-ледниковых супесях, постилающиеся рыхлыми породами с 0.5–1.0 м; 229.03.07.01 – дерновые глеевые, развивающиеся на рыхлых водно-ледниковых мощных песках; 247.08.22.21 – торфянисто- и торфяно-глеевые, развивающиеся на древесно-осоково-тростниковых торфах.

Обработка полученных результатов проводилась в программных продуктах Microsoft Excel, где была выполнена проверка данных на нормальность распределения по методике Е.И. Пустыльника (Пустыльник, 1968) (формулы 1 и 2), и ArcGIS PRO, в котором проводился геостатистический анализ с использованием модулей Geostatistic Analyst.

$$O_A = 3 * \sqrt{\frac{6*(n-1)}{(n+1)*(n+3)}}, \quad (1)$$

$$O_E = 5 * \sqrt{\frac{24*n*(n-2)*(n-3)}{(n+1)^2*(n+3)*(n+5)}}, \quad (2)$$

где – O_A – ошибка коэффициента асимметрии; O_E – ошибка эксцесса; n – объем выборки.

Выявление макрокомпоненты варьирования проводилось с помощью инструмента “Анализ трендов” в модуле Geostatistical Analyst ArcGIS ArcMap. Данный инструмент строит линии наилучшего соответствия (полиномы) через проецируемые точки, показывая тренды в определенных направлениях. Если полиномы параллельны осям X и Y , то считается, что детерминированных трендов не обнаружено.

Кроме визуального сходства и экспертной оценки, качество вариограммного анализа оценивалось по значению средней ошибки прогноза (ME), среднеквадратичной ошибки (RMSE) и среднеквадратической нормированной погрешности (RMSS), являющихся количественными мерами точности подбора математической модели вариограммы к эмпирической, а также по показателю остаточной дисперсии.

Расчет необходимых затрат на закупку требуемого количества CaCO_3 проводился по инструкции, установленной в Республике Беларусь (Лапа и др., 2019), где определены необходимые дозы извести для каждой из групп кислотности с шагом 0.25. Для сравнения затрат на известкование земли опытных участков были разделены на элементарные участки по принципу их использования в севооборотах, для каждого рабочего участка была определена кислотность и рассчитаны нормы внесения доломитовой муки. Экономический эффект от внедрения методики геостатистического анализа при оценке кислотности почвы на исследуемом участке рассчитывался исходя из площади, занимаемой контуром с соответствующим показателем pH_{KCl} . Стоимость доломитовой муки на момент проведения исследования (2024 г.) составляла 12 долларов США, 4.8 – железнодорожный тариф, 10.0 – доставка на поле и внесение.

При оптимизации сети пробоотбора для учета внутриверхневой неоднородности кислотности почвы использовалось одно из правил геостатистики, заключающееся в том, что при наличии сильной взаимосвязи между показателями пространственная структура одной переменной будет соответствовать другой (Oliver et al., 2010).

Одним из наиболее популярных индексов, рассчитывающихся по аэрофотоснимкам, является нормированный вегетационный индекс (NDVI). Данный индекс уже применялся для оценки почвенных свойств (Бекбаева и др., 2020; Савин и др., 2015) и как индикатор качества пахотных почв (Хутуев и др., 2024). Также проведенный анализ показал, что из пяти полей на четырех наблюдается значимая полиномиальная взаимосвязь, корреляционное отношение составляет 0.64, 0.60, 0.75 и 0.65 соответственно, что говорит о средней силе взаимосвязи на участках № 2, 3, 5 и

сильной – на участке № 4, что позволяет использовать данный индекс как предиктор для оптимизации первичной сетки отбора проб.

При корреляционном и регрессионном анализе использовалось среднеарифметическое значение индекса, полученное за три года в летний период (всего 9 снимков). В качестве основы для размещения точек в оптимизированной сети пробоотбора предлагается использовать среднеквадратические ошибки индекса, полученные с помощью стохастического моделирования Гаусса, рассчитанные по 100 реализациям (считается оптимальным количеством для репрезентативных результатов) (Основные концепции геостатистических имитаций, 2021).

Стохастическое моделирование основывается на интерполяционных поверхностях простого кригинга (в данном случае индекса NDVI), картограмма которого загружается в инструмент, после чего задается количество реализаций. Отличительной чертой стохастического моделирования является сохранение статистической структуры данных в каждой из ячеек раstra и отсутствие “сглаживания”, которое характерно для всех интерполяторов вида “кригинга”. Наличие ячеистой структуры позволяет для каждой ячейки рассчитывать среднеквадратические ошибки NDVI. После чего картограмма среднеквадратических ошибок используется в качестве весов для размещения новых точек пробоотбора: чем больше ошибка, тем больше вероятность, что там будет установлена точка.

Разработка севооборотов проводилась с учетом истории полей за период с 2015–2024 гг. Ввиду особых высокоточных требований к сельскохозяйственной технике (системы высокоточного позиционирования, автоматизированные системы рулевого управления, системы интеграции, внесения с переменной скоростью), необходимой для осуществления сельскохозяйственных операций в рамках точного земледелия, упор был сделан именно на существующие рабочие участки, так как техника в хозяйстве рассчитана на обработку участков именно такой площади (5–15 га).

Принимая во внимание специализацию фермерского хозяйства – зерновые культуры и травы, были разработаны зерновые и зернотравные севообороты с учетом кислотности каждого отдель-

ного рабочего участка, согласно техническому регламенту возделывания культур (Привалов и др. 2022).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Построение высокоточных картограмм распределения почвенных свойств с анализом их пространственной структуры возможно при использовании геостатистического анализа, подразумевающего нормальное или приближенное к нормальному распределение исследуемых данных.

Статистическая обработка значений кислотности для 5 исследуемых участков показала, что в данных имеется ряд отклонений от нормального распределения.

Экссесс у участков № 2–4 колеблется от -0.62 до -0.016 и не превышает своих среднеквадратических ошибок (от $+/-0.73$ до $+/-0.79$), в свою очередь, на поле № 1 значение эксцесса равняется -0.76 , что незначительно превышает пороговое значение ($+/-0.65$) и говорит о необходимости преобразования данных для данной выборки.

Обратная ситуация наблюдается у коэффициентов асимметрии: участок № 1 имеет значение приближенное к нулю (0.08), а на остальных участках составляет от 0.48 до 0.90 при пороговых значениях от $+/-0.38$ до $+/-0.43$, что также подтверждает необходимость приведения выборок к нормальному распределению.

Пространственная проверка данных показала отсутствие явной макрокомпоненты варьирования, поэтому удаление трендов не проводилось. Декластеризация данных в связи с равномерным размещением точек пробоотбора также не потребовалась.

Результаты предварительной проверки и обработки выборок были учтены при подборе математических моделей вариограмм к эмпирическим графикам, представленным на рисунке 2.

Сравнение ошибок прогноза и остаточной дисперсии между выбранными вариограммами и наиболее популярными (сферическая и экспоненциальная) приведено в таблице 2.

В связи с незначительными отличиями в ошибках прогноза, основным критерием для выбора той или иной математической модели или их сочетаний послужил показатель остаточной дисперсии, отражающий долю микрокомпоненты варьирования, которая была не закартографирована.

Пространственное распределение кислотности на первом участке описывается одной устойчивой моделью вариограммы и характеризуется постепенным возрастанием дисперсии при увеличении расстояния практически без отклонений. Можно выделить диапазон от 300 до 450 м, где наблюдается незначительный спад значений с последующим увеличением. Данный диапазон соответствует расстоянию между вершинами холмов, а также длинам склонов на участке, что дает основание предполагать относительную схожесть значений кислотности на указанных расстояниях.

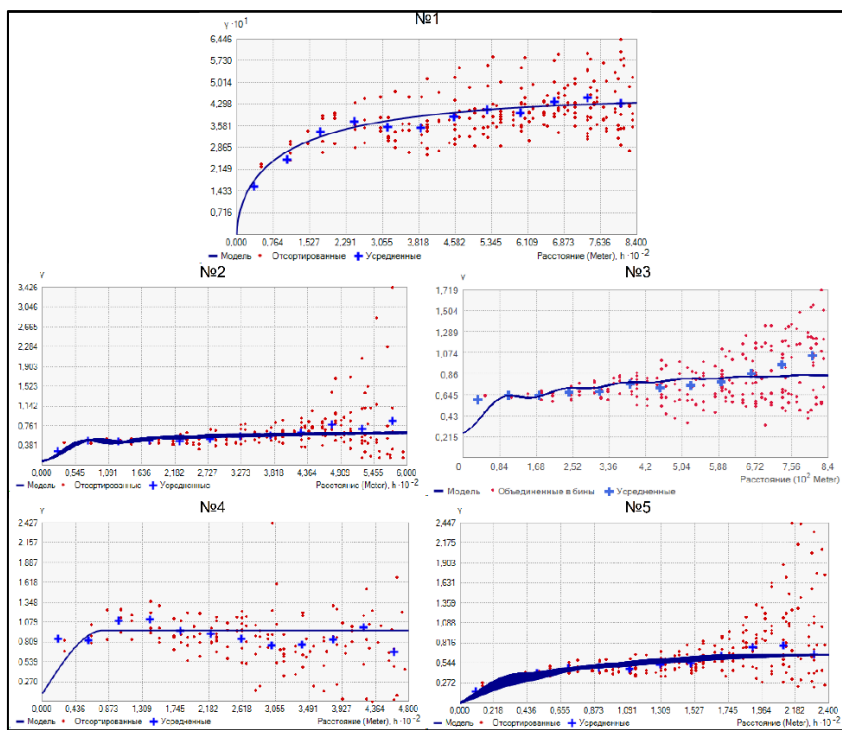


Рис. 2. Вариограммы рабочих участков КФХ "Гутько С."
Fig. 2. Variograms of working areas on the farm "Gutko S."

Табл. 2. Показатели ошибок прогноза вариограмм рабочих участков КФХ “Гутько С.”

Table 2. Indicators of errors in the forecast of variograms of working areas of the peasant farm “Gutko S.”

Рабочий участок	Вариограммы	Средняя ошибка прогноза (ME)	Среднеквадратическая ошибка прогноза (RMSE)	Среднеквадратическая нормированная погрешность (RMSS)	Ост. дисперсия, %
1	Устойчивая	0.0041	0.4847	0.9517	0.00
	Экспоненциальная	0.0033	0.4889	0.9328	0.00
	Сферическая	0.0016	0.4996	0.8999	0.00
2	Экспоненциальная/Экспоненциальная/J-Бесселя	-0.0366	0.6854	1.0847	13.4
	Экспоненциальная	-0.0304	0.7185	1.0707	91.1
	Сферическая	-0.0289	0.7215	1.0663	72.9
3	Экспоненциальная/Эффекта дыры	-0.0043	0.8823	1.0929	29.9
	Экспоненциальная	0.0027	0.8751	1.0682	80.7
	Сферическая	0.0036	0.8706	1.0460	61.2
4	Круговая	0.0043	0.8138	0.9252	47.6
	Экспоненциальная	0.0025	0.8530	0.9165	18.8
	Сферическая	0.0050	0.7981	0.9211	11.3
5	Сферическая/Круговая/Эффекта дыры	-0.0053	0.4181	0.9311	0.00
	Экспоненциальная	-0.0001	0.4951	0.9490	22.7
	Сферическая	0.0018	0.5378	0.9562	50.0

Более сложная структура выявлена на ключевом участке № 2, где для максимального уменьшения наггет-эффекта и неучтенной части варьирования понадобилось использование 3 вариограмм – 2 экспоненциальных и 1 j-Бесселя. Экспоненциальные вариограммы позволяют учитывать автокорреляционные взаимосвязи на всем участке (600 м), а j-Бесселя улавливает колебания на малых дистанциях – до 150 м. Также на участке присутствует незначительная анизотропия по направлению с юго-запада на северо-восток, что соответствует направлению склона.

Кислотность на третьем поле характеризует вариограммой j-Бесселя и экспоненциальной, а также относительно высоким значением наггет-эффекта (0.258), что говорит об имеющихся “шумах”, которые не будут учтены в итоговой картограмме. Наблюдается резкий рост дисперсии на расстояниях 670–840 м, что указывает на резкие изменения факторов, влияющих на кислотность почвы данного поля.

Лучшей моделью для четвертого участка является сферическая вариограмма, позволяющая минимизировать долю микрокомпоненты варьирования. В отличие от остальных полей, на данной территории присутствуют резкие скачки дисперсии, что подчеркивает многофакторное воздействие при формировании кислотности. На 80–130 м наблюдается резкий подъем значений, после чего происходит плавный спад до 300–350 м, резкий подъем на 430 м с последующим снижением. Предположительно, такие колебания связаны с микроизменениями рельефа, влиянием растительности, а именно – игольчатого опада от сосняка, расположенного по границе поля, который подкисляет почву, а также с незначительной площадью участка и слабым гомогенизирующим антропогенным воздействием.

Последний ключевой участок является наименьшим по площади, однако для описания пространственного варьирования кислотности понадобилось использование также трех вариограмм – сферической, круговой и с эффектом дыры, – позволяющих улавливать взаимосвязь между точками на всем участке (240 м). В целом вариограмма характеризуется постепенным увеличением, незначительными колебаниями на расстояниях 200–220 м и наличием анизотропии. При этом анизотропия присутствует у сферической вариограммы на расстояниях до 40–45 м (на рисунке 2 отражено через расхождения

вариограмм по направлениям) по направлению “юго-запад – северо-восток”, а также у круговой диаграммы, но уже по направлению “север – юг” и с расстоянием в 140–150 м.

Подобранные вариограммы дают представление о пространственном варьировании кислотности и расстояниях протекания различных почвенно-геохимических процессов, влияющих на итоговый результат. Вместе с тем по основным показателям вариограмм представляется возможным оценить качество итоговых картограмм и силу пространственной автокорреляции (табл. 3).

Таблица 3. Параметры моделей вариограмм опытных участках

Table 3. Parameters of variogram models for experimental plots

Участок	Модель	Лаг, м	Нагетт, C_0	Порог, C_0+C	Ранг, м	Остаточная дисперсия $C_0/(C_0+C)$, %
1	устойчивая	70	0	0.4571	840	0.00
2	экспоненци- альная/ экспоненци- альная/ j-Бесселя	50	0.086	0.642	600/600/123	13.4
3	экспоненци- альная/ j-Бесселя	70	0.258	0.862	840/133	29.9
4	сферическая	40	0.108	0.960	78.6	11.3
5	сферическая/ круговая/ эффекта дыры	20	0.000	0.652	114/240/43.6	0.00

Для участков № 1 и № 5 остаточная дисперсия равняется нулю, что говорит об очень сильной пространственной зависимости и о минимизации “шумов”. Три вариограммы на пятом ключе описывают варьирование на расстояниях в 43.6 м (вариограмма с эффектом дыры), в 114 м – сферическая и в 240 м – круговая.

Поля № 2 и № 4 характеризуются сильной пространственной зависимостью и незначительной долей наггет-эффекта (13.4 и 11.3% соответственно). Автокорреляция на участке № 4 присутствует до 78.6 м, что составляет 16.3% от всей территории. На ключе № 2 ранг у вариограммы j-Бесселя составляет 123 м, однако наличие двух экспоненциальных вариограмм позволяют улавливать взаимосвязи на всем участке (640 м).

Показатели вариограммы кислотности на третьем поле отражают среднюю пространственную зависимость (остаточная дисперсия 29.9%), что говорит о практически 30% шумов, которые не будут отражены при построении картограмм.

Основываясь на показателях вариограмм, можно утверждать, что картограммы (рис. 3), полученные с их использованием, будут иметь высокую точность и могут быть использованы в дальнейшем анализе и расчетах.

На рисунке 3 также представлена картограмма кислотности по элементарным участкам хозяйства, которые применяются в настоящее время при агрохимическом обследовании сельскохозяйственных земель Беларуси. Данные картограммы позволяют визуально оценить, насколько сильно такой подход генерализирует внутреннюю неоднородность полей. В связи с этим дальнейший анализ будет проводиться по картограммам, полученным по методике геостатистического подхода.

Восточная и центральная части участка № 1 представлены дерново-подзолистой сильно- и среднеподзоленной, местами слабоэродированной почвой на легких водно-ледниковых суглинках с нейтральной реакцией среды (pH_{KCl} 6.51–7.00), близкой к нейтральной (6.01–6.50) и слабокислой (5.51–6.00). Западная и южная части представлены дерново-подзолистой слабоподзоленной, местами слабоэродированной почвой на рыхлых водно-ледниковых супесях, почва в основном является среднекислой (4.51–5.00), кислой (5.01–5.50) и слабокислой (5.51–6.00), что сопоставимо с естественным уровнем кислотности для данной почвы в условиях Беларуси.

Выделяется северо-западная часть поля с кислотностью близкой к нейтральной (6.01–6.50) и нейтральной (6.51–7.00), на которой было проведено известкование почв. На крайнем северо-

западе расположена область торфянисто- и торфяно-глеевых почв, преимущественно на осоковых, осоково-тростниковых и древесно-осоково-тростниковых торфах, которые характеризуются как слабокислые (5.51–6.00). На возвышенных местах исследуемого участка наблюдается нейтральная (6.51–7.00) и слабощелочная (более 7.01) реакция среды, что объясняется выходом водно-ледниковой карбонатной морены. Схожесть протекания геохимических процессов на возвышенностях также подтверждает расстояния уменьшения дисперсии, выявленные по вариограмме.

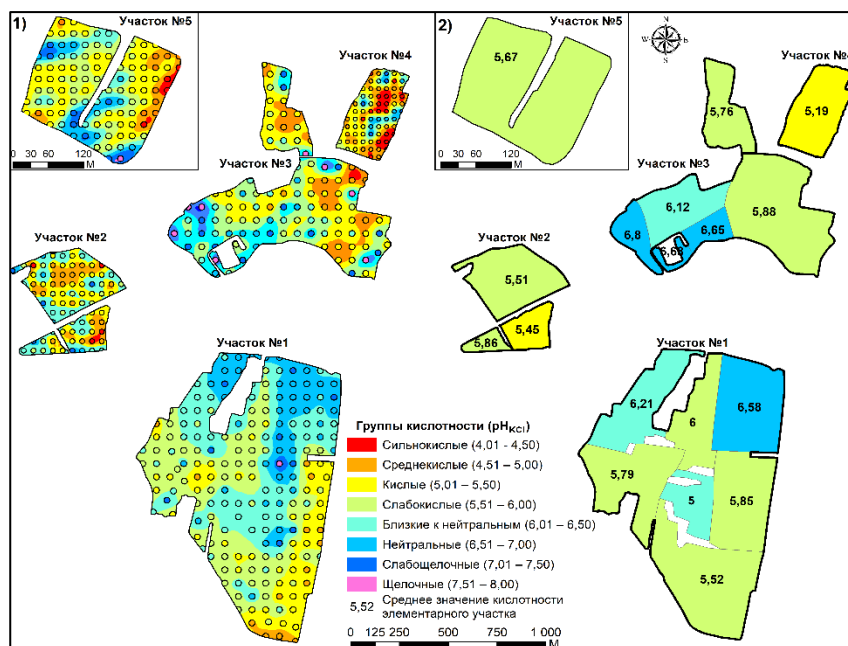


Рис. 3. Картограммы кислотности почв рабочих участков КФХ “Гутко С.”, построенные по методике: 1) геостатистического подхода; 2) агрохимического обследования земель Беларуси.

Fig. 3. Cartograms of soil acidity in working areas of farm “Gutko S.” developed according to: 1) geostatistical approach; 2) agrochemical survey of lands in Belarus.

На опытном участке № 2 преобладают дерново-подзолистые слабоподзоленные, местами слабоэродированные на рыхлых водно-ледниковых супесях почвы, согласно полученной картограмме, они имеют более кислую реакцию среды (pH_{KCl} менее 5.50), что объясняется меньшим уровнем известкования на данной территории, а также большим массивом торфянисто-глеевых почв с более низкими значениями pH_{KCl} .

Ключевой участок № 3 характеризуется значительной дифференциацией кислотности: обнаружился как ареалы среднекислых почв (pH_{KCl} 4.50–5.00), приуроченных к дерново-глеевым на востоке участка, так и ареалы щелочных (pH_{KCl} 7.00–7.50) и среднешелочных (pH_{KCl} более 7.50) почв, сконцентрированных в западной части территории, где значительно дольше велась обработка земель. Стоит отметить, что расстояние между данными ареалами составляет около 670 м, объясняя резкий рост дисперсии на вариограмме.

На всех трех участках также можно выделить ареалы щелочных почв, расположенных на вершинах склонов, что является следствием близкого залегания подстилающих пород, представленных карбонатной мореной.

Ключевые участки № 4 и 5 расположены в непосредственной близости друг от друга и были включены в сельскохозяйственное использование последними, в связи с этим на них сохранилась природная гетерогенность кислотности. Наиболее ярко это представлено на ключевом участке № 4, где наблюдается максимальная кислотность из всех опытных полей (pH_{KCl} менее 4.50), при этом в непосредственной близости располагаются ареалы слабощелочных почв (pH_{KCl} более 6.50), что визуальнo показывают скачки дисперсии на вариограмме на соответствующих расстояниях в 80–90 м.

Выявленная высокая степень неоднородности кислотности почв (на всех участках наблюдается от 5 групп кислотности, даже на полях площадью менее 10 га (ключ № 4 и № 5)) позволяет утверждать, что классические методы агрохимического обследования при известковании почв не будут учитывать внутрипольную неоднородность и, как следствие, приведут к нерациональному использованию мелиоранта (CaCO_3), а также к еще большим раз-

личиям и в результате – к потере урожая. Для доказательства данного утверждения была составлена ведомость затрат на известкование земель с учетом закупки, транспортировки и внесения мелиоранта (табл. 4).

Согласно сводной ведомости по затратам на известкование земель КФХ “Гутько С.”, внесение доломитовой муки методом отбора единичного образца в одной точке гораздо дешевле, чем методом агрохимических обследований с формированием одного смешанного образца с элементарных участков, что позволяет экономить денежные средства хозяйства в размере около 1 200 долларов США. На всех участках, кроме № 3, метод грида значительно уменьшает объемы внесения CaCO_3 . Но при этом на участке № 3 наблюдается обратная ситуация. Это говорит о том, что имеются значительные колебания кислотности почвы, которые нельзя увидеть при проведении агрохимического обследования, и это приведет к увеличению внесения доломитовой муки на данном участке. Несмотря на увеличение затрат, детальное (точечное) внесение мелиоранта позволит выровнять природную гетерогенность и повысить эффективность использования земель за счет увеличения урожайности.

Таблица 4. Сводная ведомость по затратам на известкования земель КФХ “Гутько С.”

Table 4. Summary statement of costs for liming the lands of the peasant farm “Gutko S.”

Номер участка	Агрохимическое обследование		Метод грида		Дельта	
	CaCO_3 , тонн	Затраты, \$ США	CaCO_3 , тонн	Затраты, \$ США	CaCO_3 , тонн	Затраты, \$ США
1	150.3	1803.6	90.2	1082.4	60.1	721.2
2	61.3	735.6	12.7	151.8	48.6	583.2
3	21.0	252.0	32.7	392.3	-11.7	-140.4
4	39.9	478.8	38.4	460.8	1.5	18
5	10.8	129.6	6.9	82.8	3.9	46.8
Сумма	283.3	3339.6	180.9	2170.1	102.4	1228.8

Также стоит учесть, что 29.9% микронеоднородности кислотности на поле № 3 не было отражено на итоговой картограмме, в связи с этим можно предположить, что при увеличении точек пробоотбора повысится точность картографирования. Однако обычное добавление точек по полю посредством уменьшения лага между ними может быть экономически нецелесообразно. В таком случае возможным решением является оптимизация имеющейся сети мониторинга с незначительным увеличением точек только в случаях объективной необходимости.

Для оптимизации сети пробоотбора предлагается использовать вегетационный индекс NDVI, который, в случае подтверждения взаимосвязи с кислотностью (рис. 4), может быть использован в качестве предиктора для размещения точек отбора.

На ключевом участке № 3 применяется полиномиальная функция 4-го порядка, однако, как и на других графиках, заметна тенденция к снижению NDVI на кислых и щелочных почвах, что подтверждает закон оптимума. Ключевой участок № 1 характеризуется прямой линейной взаимосвязью (коэффициент корреляция 0.529), что объясняется отсутствием кислых почв и незначительным количеством контуров щелочных.

Наблюдается снижение взаимосвязи на участках с более расчлененным рельефом, что объясняется влиянием на рост культур эрозионных процессов, экспозиции склонов и др. Кроме того, важным фактором выступают возделываемые культуры: некоторые из них предпочитают более кислые почвы (многолетние травы, гречиха), другие – близкие к нейтральным (ячмень, кукуруза, пшеница), что также влияет на результаты регрессионного анализа.

На основании информации о детальном распределении кислотности почвы, вегетационного индекса, отражающего продуктивность земель, а также о конфигурации рабочих участков было предложено оптимизировать некоторые из них и разделить на более мелкие для повышения эффективности производства (рис. 5), а для участка № 3 (выбран в связи с высокой остаточной дисперсией) – разработать новую сетку отбора проб.

Ввиду особых высокоточных требований к сельскохозяйственной технике, необходимой для осуществления сельскохозяй-

ственных операций в рамках точного земледелия, упор был сделан именно на существующие элементарные участки (ЭУ), так как техника хозяйства рассчитана на обработку участков именно такой площади (5–15 га).

Для полученных элементарных участков предлагается ввести новые севообороты с целью оптимизации производства, которые учитывают средневзвешенные значения кислотности (табл. 5).

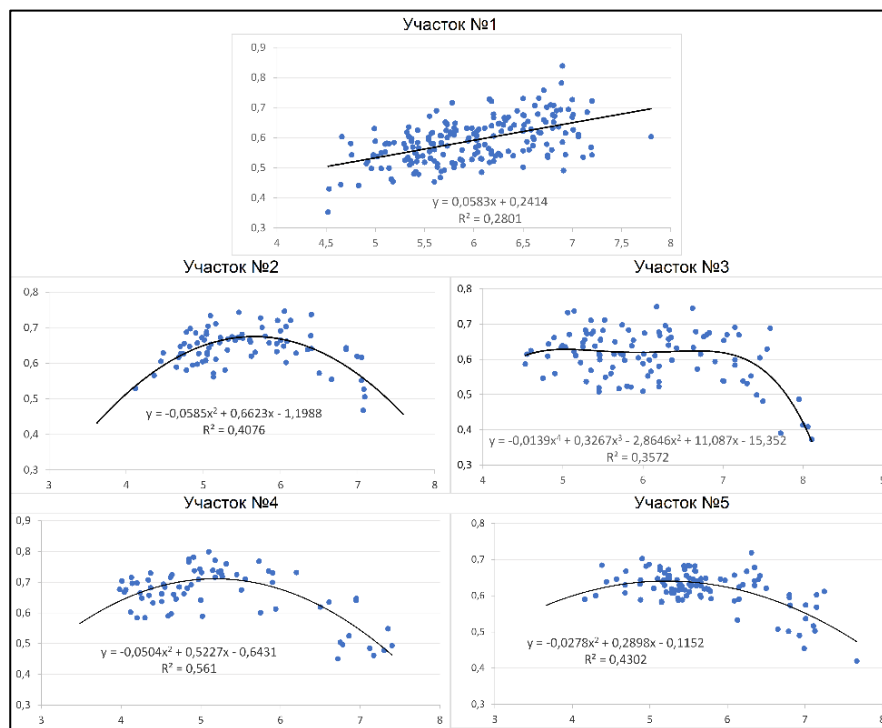


Рис. 4. Графики регрессионной зависимости кислотности почв и NDVI рабочих участков КФХ “Гутько С.”.

Fig. 4. Regression graphs of soil acidity and NDVI of fields on the farm “Gutko S.”.

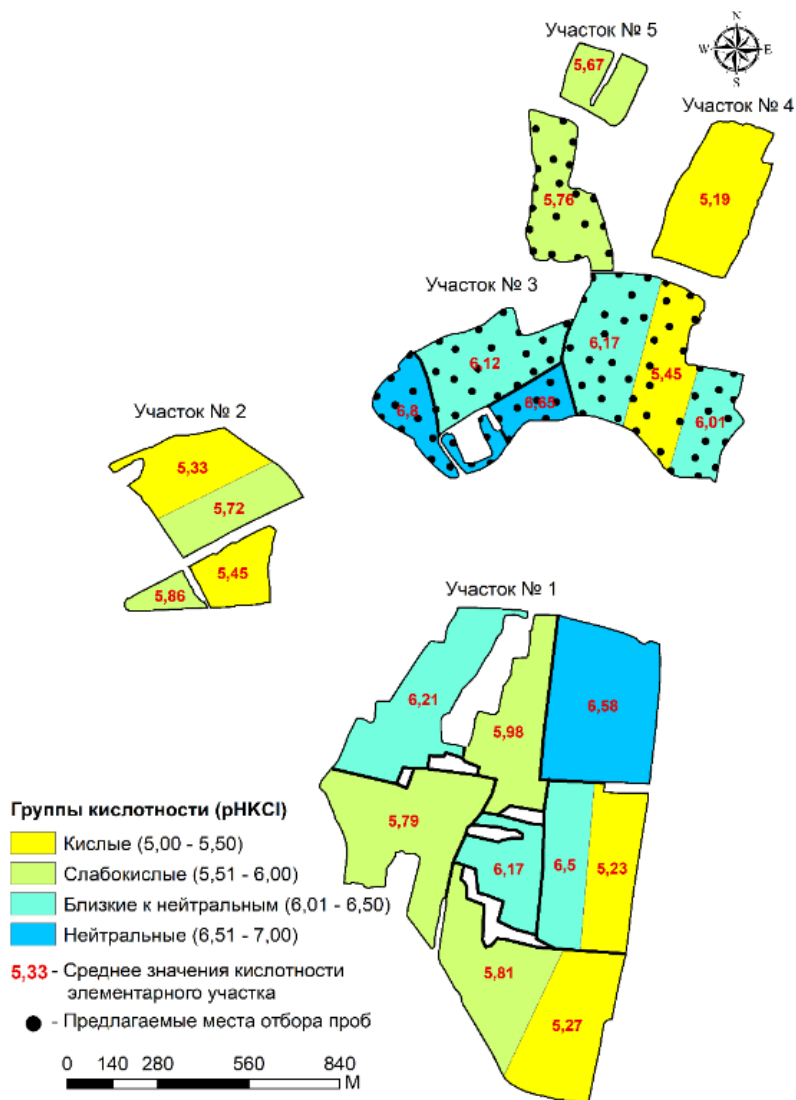


Рис. 5. Предлагаемая схема размещения элементарных участков КФХ “Гутько С.”.

Fig. 5. Proposed layout of elementary plots of the farm “Gutko S.”.

Таблица 5. Предлагаемые севообороты КФХ “Гутько С.”
Table 5. Proposed crop rotations for the peasant farm “Gudkov S.”

pH_{KCl}	Севообороты				
5.01–5.50	многолетние травы	овес	тритикале	многолетние травы	многолетние травы
5.51–6.00	тритикале	овес	однолетние травы	гречиха	овес
6.01–6.50	пшеница	овес	кукуруза	ячмень	тритикале
6.51–7.00	ячмень	тритикале	кукуруза	ячмень	овес

Овес и тритикале менее требовательны к кислотности почвы, что позволяет получать высокие урожаи на кислых почвах. Элементарные участки с кислотностью 5.01–5.50 предлагается использовать под зернотравный севооборот с чередованием следующих культур: овес – тритикале – многолетние травы (3 года).

ЭУ с pH_{KCl} 5.51–6.00 – под зернотравный севооборот с таким чередованием: тритикале – овес – однолетние травы – гречиха – овес. Гречиха также не сильно требовательна к кислотности почвы (5–6.5) и способствует обогащению верхних горизонтов питательными элементами за счет их поступления из нижележащих.

Для участков с pH_{KCl} 6.01–6.50: пшеница – овес – кукуруза – ячмень – тритикале. Пшеница, ячмень и кукуруза более требовательны к питательным веществам, макро-, микроудобрениям, содержанию гумуса, внесению органических удобрений. Эти культуры предпочитают кислотность в диапазоне 6.0–6.5.

ВЫВОДЫ

В целом вариограммный анализ показал, что пространственная структура кислотности почв на исследуемых участках является следствием комплексного воздействия факторов почвообразования, при этом на участках №№ 1–3 превалирует влияние подстилающей породы вследствие близкого залегания карбонатной морены. Повышенная дифференциация значений pH_{KCl} на участке № 3 (от среднекислых почв на востоке территории до среднешелочных на западе) связана со значительно большим ан-

тропогенным воздействием, вызванным более долгой историей сельскохозяйственного использования данной части участка (с XIX в.), что подтверждается высокими значениями дисперсии на расстояниях в 670 м.

Ключевые участки № 4 и № 5 вследствие меньшего гомогенизирующего влияния сохранили природную гетерогенность, что подтверждается вариограммами. На участке № 4 присутствует резкий подъем значений дисперсии на расстояниях 80–130 м, после чего происходит плавный спад до 300–350 м, резкий подъем на 430 м с последующим снижением.

Таким образом, вариограммный анализ позволяет четко определять расстояния протекания схожих (уменьшение дисперсии) и различных (ее увеличение) почвенно-геохимических процессов на территории, а также факторы влияния на изучаемое свойство.

Полученные картограммы с высокой точностью отражают реальную картину распределения кислотности вследствие низкой остаточной дисперсии и отсутствия “шумов” (исключение участок № 3, где 29.9% неоднородности не было учтено), что позволило рассчитать реальную потребность в известковании. Результаты показывают, что затраты на известкование земель КФХ с использованием детальных картограмм меньше, чем методом элементарных участков, что позволяет экономить денежные средства хозяйства в расчете “франко-почва” в размере 1 200 долларов США, что подтверждает результаты ранее проводимых исследований на других участках (Воробей и др., 2024; Киндеев, 2022).

Использование данных дистанционного зондирования в качестве вспомогательных предикторов для предварительного исследования территории и оптимизации сетей пробоотбора возможно, но требует четкого подбора показателей. Индекс NDVI показал значимую, а в ряде случаев высокую полиномиальную взаимосвязь с кислотностью (корреляционное отношение от 0.60 до 0.75 на ключах № 2–4) и прямую линейную взаимосвязь на ключе № 1 (0.56), тем самым доказывая, что оптимальные значения pH_{KCl} варьируют от 5.0 до 6.0. В свою очередь, большой разброс значений на графиках показывает, что при одном значении

кислотности могут быть разные значения NDVI, что говорит о влиянии других факторов на всхожесть культур.

Предполагается, что новая сетка пробоботбора, построенная на основе индекса NDVI, позволит учесть больший процент внутренней пространственной неоднородности кислотности почвы и увеличит точность картограммы на ключевом участке № 3, что является одним из направлений дальнейших исследований.

Учет пространственного распределения кислотности почв, всхожести культур на основании индекса NDVI и истории полей позволил предложить новые схемы элементарных участков с севооборотами, учитывающими кислотность почвенного покрова.

Полученные результаты позволяют косвенно подтвердить возможность дальнейшего развития в области использования индексов, основанных на спектрально-отражательной способности почв, как дополнительных предикторов при цифровом картографировании почвенных свойств, что также согласуется с недавними исследованиями концепции линии почв для картографирования и мониторинга почв (Савин и др., 2025).

Важно отметить, что предложенное деление рабочих участков на элементарные не в полной мере соответствует принципам точного земледелия и ориентировано на имеющиеся возможности сельскохозяйственной техники.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агропромышленный комплекс России в 2019 году. М.: ФГБНУ “Росинформагротех”, 2020. 564 с.
2. Бакина Л.Г., Чугунова М.В., Зайцева Т.Б., Небольсина З.П. Влияние известкования на комплекс почвенных микроорганизмов и гумусовое состояние дерново-подзолистой почвы в многолетнем опыте // Почвоведение. 2014. № 2. С. 225–234.
3. Бекбаева А.М., Мажренова Ш.К., Ермеков Ф.К., Токбергенов И.Т., Куришбаев А.К. Классификация содержания фосфора методами машинного обучения по данным дистанционного зондирования Земли // The Scientific Heritage. 2020. № 56–3. С. 29–36.
4. Богдевич И.М. Итоги и перспективы оптимизации агрохимических показателей плодородия пахотных почв Беларуси // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия аграрных наук. 2023. Т. 61. № 1. С. 22–33.

5. Воробей М.В., Киндеев А.Л. Геостатистический анализ внутрипольной неоднородности почвенной кислотности для проведения работ по известкованию // Почвоведение и агрохимия. 2024. № 1(72). С. 27–34.
6. Глобальное почвенное партнерство. URL: <https://www.fao.org/global-soil-partnership/resources/highlights/detail/ru/c/1470631/>.
7. ГОСТ 26484–85. Метод определения обменной кислотности.
8. Иванов А.Л., Столбовой В.С., Гребенников А.М., Оглезнев А.К., Петросян Р.Д., Шилов П.М. Ранжирование кислых почв по приоритетности проведения известкования в Российской Федерации // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2020. № 103. С. 168–187. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-103-168-187>.
9. Киндеев А.Л. Перспективные направления геостатистического анализа и стохастического моделирования с учетом экономических издержек при точном земледелии // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. 2022. № 2. С. 59–70.
10. Красильников П.В., Таргульян В.О. На пути к “новой географии почв”: вызовы и решения (обзор) // Почвоведение. 2019. № 2. С. 131–139.
11. Лапа В.В., Пироговская Г.В., Богдевич И.М. Инструкция по известкованию кислых почв сельскохозяйственных земель. Минск: Ин-т почвоведения и агрохимии, 2019. 32 с.
12. Мальшевский В.А., Федулов Ю.П., Островский Н.В., Лебедевский И.А. Расчет содержания гумуса с использованием данных дистанционного зондирования Земли // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2013. №. 92. С. 859–883.
13. Нурлыгаянов Р.Б., Гиниятова Ф.Ф., Зайнагабдинов А.Ф., Хаернасов И.И. Известкование кислых почв: прошлое и настоящее // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. 2021 № 1. Р. 34–41.
14. Окорков В.В. К теории химической мелиорации кислых почв // Агрохимия. 2019. № 9. С. 3–17. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0002188119090096>.
15. Основные концепции геостатистических имитаций. URL: <https://desktop.arcgis.com/ru/arcmap/latest/extensions/geostatistical-analyst/key-concepts-of-geostatistical-simulation.htm>.
16. Охрана окружающей среды в России. 2020. М.: Росстат, 2020. 113 с.
17. Пустыльник Е.И. Статистические методы анализа и обработки наблюдений. М., 1968. 289 с.
18. Привалов Ф.И., Павловский В.К., Гракун В.В., Лапа В.В., Сорока С.В., Вахонин Н.К., Шиманский Л.П. Организационно-технологические нормативы возделывания зерновых, зернобобовых, крупяных культур,

технических и кормовых растений. РУП “Научно-практический центр НАН Беларуси по земледелию”. Минск: ИВЦ Минфина, 2022. 530 с.

19. Самсонова В.П., Благовещенский Ю.Н., Мешалкина Ю.Л. Использование эмпирического Байесовского кригинга для выявления неоднородностей распределения органического углерода на сельхозугодьях // Почвоведение. 2017. № 3. С. 321–328.

20. Савин И.Ю., Виндекер Г.В. Некоторые особенности использования оптических свойств поверхности почв для определения их влажности // Почвоведение. 2021. № 7. С. 806–814.

21. Савин И.Ю., Танов Э.Р., Харзинов С. Использование вегетационного индекса NDVI для оценки качества почв пашни (на примере Баксанского района Кабардино-Балкарии) // Бюллетень почвенного института им. В.В. Докучаева. 2015. Вып. 77. С. 51–65. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2015-77-51-65>.

22. Савин И.Ю., Терехов А.Г., Мухамедиев Р.И. Концепция линии почв и ее использование для картографирования и мониторинга почв (обзор). Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2025. Вып. 122. С. 174–193. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2025-122-174-193>.

23. Хутуев А.М., Занилов А.Х., Тутукова Д.А., Савин И.Ю. NDVI посевов как дистанционный индикатор качества пахотных почв // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2024. Вып. 121. С. 70–85. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2024-121-70-85>.

24. Шильников И.А., Сычёв В.Г., Зеленов Н.А., Аканова Н.И., Федотова Л.С. Известкование как фактор урожайности и почвенного плодородия. М.: ВНИИА, 2008. 340 с.

25. Якушев В.В. Информационно-технологические основы прецизионного производства растениеводческой продукции: Дис. ... д-ра с.-х. наук. 06.01.03. Санкт-Петербург, 2013. 367 с.

26. Heuvelink G.B.M., Webster R.A. Modelling soil variation: past, present, and future // Geoderma. 2001. Vol. 100. Iss. 3/4. P. 269–301.

27. Hofman D.J., Siegfried C.K. How many sampling points are needed to estimate the mean nitrate-N content of agricultural fields? A geostatistical simulation approach with uncertain variograms // Geoderma. 2021. Vol. 385. Art. 114816.

28. McBratney A.B., Gruijter J., Bryce A. Pedometrics timeline // Geoderma. 2019. Vol. 338. P. 568–575.

29. McBratney A.B., Minasny B., Stockmann U. Pedometrics. Australia: The University of Sydney, 2018. 713 p.

30. Oliver V.A., Kerry R., Frogbrook Z.L. Sampling in Precision Agriculture. Geostatistical Applications for Precision Agriculture. Ed.: M.A. Oliver. Dordrecht, 2010. P. 35–64.

31. Raj E.F.I., Appadurai M., Athiappan K. Precision farming in modern agriculture // Smart agriculture automation using advanced technologies: Data analytics and machine learning, cloud architecture, automation and IoT. Singapore: Springer Singapore, 2022. P. 61–87.
32. The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture – Systems at breaking point. Synthesis report. Rome. 2021. 82 p. DOI: <https://doi.org/10.4060/cb7654en>.
33. Uwiragiye Y., Ngaba M.J.Y., Yang M., Elrys A.S., Chen Z., Zhou, J. Spatially Explicit Soil Acidification under Optimized Fertilizer Use in Sub-Saharan Africa // *Agronomy*. 2023. Vol. 13. P. 632.
34. Xiao S., Ou M., Geng Y., Zhou T. Mapping soil pH levels across Europe: An analysis of LUCAS topsoil data using random forest kriging (RFK) // *Soil Use and Management*. 2023. Vol. 39(2). P. 900–916.

REFERENCES

1. Agropromyshlennyyi kompleks Rossii v 2019 godu (Agro-industrial complex of Russia in 2019), Moscow: FGBNU “Rosinformagrotekh”, 2020, 564 p.
2. Bakina L.G., Chugunova M.V., Zaitseva T.B., Nebol'sina Z.P., Vliyanie izvestkovaniya na kompleks pochvennykh mikroorganizmov i gumusovoe sostoyanie dernovo-podzolistoi pochvy v mnogoletnem opyte (The effect of liming on the complex of soil microorganisms and the humus state of sod-podzolic soil in a long-term experiment), *Pochvovedenie*, 2014, No. 2, pp. 225–234.
3. Bekbaeva A.M., Mazhrenova Sh.K., Ermekov F.K., Tokbergenov I.T., Kurishbaev A.K., Klassifikatsiya sodержaniya fosfora metodami mashinnogo obucheniya po dannym distantsionnogo zondirovaniya Zemli (Classification of phosphorus content by machine learning methods based on Earth remote sensing data), *The Scientific Heritage*, 2020, No. 56–3, pp. 29–36.
4. Bogdevich I.M., Itogi i perspektivy optimizatsii agrokhimicheskikh pokazatelei plodorodiya pakhotnykh pochv Belarusi (Results and prospects of optimization of agrochemical fertility indicators of arable soils in Belarus), *Izvestiya Natsional'noi akademii nauk Belarusi. Seriya agrarnykh nauk*, 2023, Vol. 61, No. 1, pp. 22–33.
5. Vorobei M.V., Kindeev A.L., Geostatisticheskii analiz vnutripol'noi neodnorodnosti pochvennoi kislotnosti dlya provedeniya rabot po izvestkovaniyu (Geostatistical analysis of in-field heterogeneity of soil acidity for liming), *Pochvovedenie i agrokhiimiya*, 2024, No. 1(72), pp. 27–34.
6. Global'noe pochvennoe partnerstvo (Global soil partnership.), URL: <https://www.fao.org/global-soil->

partnership/resources/highlights/detail/ru/c/1470631/.

7. GOST 26484-85. Metod opredeleniya obmennoi kislotnosti (Method for determining exchangeable acidity).

8. Ivanov A.L., Stolbovoy V.S., Grebennikov A.M., Ogleznev A.K., Petrosyan R.D., Shilov P.M., Ranking of acidic soils by priority of liming in the Russian Federation, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2020, Vol. 103, pp. 168–187, DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-103-168-187>.

9. Kindeev A.L., Perspektivnye napravleniya geostatisticheskogo analiza i stokhasticheskogo modelirovaniya s uchetom ekonomicheskikh izderzhek pri tochnom zemledelii (Promising directions of geostatistical analysis and stochastic modeling taking into account economic costs in precision farming), *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 17: Pochvovedenie*, 2022, No. 2, pp. 59–70.

10. Krasil'nikov P.V., Targul'yan V.O., Na puti k “novoi geografii pochv”: vyzovy i resheniya (obzor) (Towards a “New Soil Geography”: Challenges and Solutions (review)), *Pochvovedenie*, 2019, No. 2, pp. 131–139.

11. Lapa V.V., Pirogovskaya G.V., Bogdevich I.M., *Instruktsiya po izvestkovaniyu kislykh pochv sel'skokhozyaistvennykh zemel'* (Instructions for liming acidic soils of agricultural lands), Minsk: In-t pochvovedeniya i agrokhimii, 2019, 32 p.

12. Malyshevskii V.A., Fedulov Yu.P., Ostrovskii N.V., Lebedovskii I.A., Raschet soderzhaniya gumusa s ispol'zovaniem dannykh distantsionnogo zondirovaniya zemli (Calculation of humus content using Earth remote sensing data), *Politematicheskii setevoi elektronnyi nauchnyi zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2013, No. 92, pp. 859–883.

13. Nurlygayanov R.B., Giniyatova F.F., Zainagabdinov A.F., Khaernasov I.I., Izvestkovanie kislykh pochv: proshloe i nastoyashchee (Liming of acidic soils: past and present), *Vestnik Bashkirskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2021, No. 1, pp. 34–41.

14. Okorkov V.V., K teorii khimicheskoi melioratsii kislykh pochv (On the theory of chemical melioration of acidic soils), *Agrokhimiya*, 2019, No. 9, pp. 3–17, DOI: <https://doi.org/10.1134/S0002188119090096>.

15. Osnovnye kontseptsii geostatisticheskikh imitatsii (Basic concepts of geostatistical simulations), URL: <https://desktop.arcgis.com/ru/arcmap/latest/extensions/geostatistical-analyst/key-concepts-of-geostatistical-simulation.htm>.

16. Okhrana okruzhayushchei sredy v Rossii (Environmental Protection in Russia), 2020, Moscow: Rosstat, 2020, 113 p.

17. Pustyl'nik E.I., *Statisticheskie metody analiza i obrabotki nablyudenii* (Statistical methods of analysis and processing of observations), Moscow,

1968, 289 p.

18. Privalov F.I., Pavlovskii V.K., Grakun V.V., Lapa V.V., Soroka S.V., Vakhonin N.K., Shimanskii L.P., *Organizatsionno-tekhnologicheskie normativy vozdel'yvaniya zernovykh, zernobobovykh, krupyanykh kul'tur, tekhnicheskikh i kormovykh rastenii. RUP "Nauchno-prakticheskii tsentr NAN Belarusi po zemledeliyu"* (Organizational and technological standards for the cultivation of grain, legumes, cereal crops, industrial and forage plants. RUE "Scientific and Practical Center of the NAS of Belarus for Agriculture"), Minsk: IVTs Minfina, 2022, 530 p.

19. Samsonova V.P., Blagoveshchenskii Yu.N., Meshalkina Yu.L., *Ispol'zovanie empiricheskogo Baiesovskogo kriginga dlya vyyavleniya neodnorodnostei raspredeleniya organicheskogo ugleroda na sel'khozugod'yakh* (Using empirical Bayesian kriging to identify heterogeneities in the distribution of organic carbon on farmland), *Pochvovedenie*, 2017, No. 3, pp. 321–328.

20. Savin I.Yu., Vindeker G.V., *Nekotorye osobennosti ispol'zovaniya opticheskikh svoystv poverkhnosti pochv dlya opredeleniya ikh vlazhnosti* (Some features of using optical properties of soil surfaces to determine soil moisture content), *Pochvovedenie*, 2021, No. 7, pp. 806–814.

21. Savin I. Yu., Tanov E. R., Kharzinov S. The use of NDVI profiles for estimating the quality of arable lands (exemplified by the Baksan region in Kabardino-Balkaria), *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2015, Vol. 77, pp. 51–65, DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2015-77-51-65>.

22. Savin I.Yu., Terekhov A.G., Mukhamediev R.I., Soil line concept and its use for soil mapping and monitoring (overview), *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2025, Vol. 122, pp. 174–193, DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2025-122-174-193>.

23. Khutuev A.M., Zanirov A.Kh., Tutukova D.A., Savin I.Yu., NDVI of crops as a remote indicator of arable soils quality, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2024, Vol. 121, pp. 70–85, DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2024-121-70-85>.

24. Shil'nikov I.A., Sychev V.G., Zelenov N.A., Akanova N.I., Fedotova L.S., *Izvestkovanie kak faktor urozhnainosti i pochvennogo plodorodiya* (Liming as a factor of crop yield and soil fertility), Moscow: VNIIA, 2008, 340 p.

25. Yakushev V.V., *Informatsionno-tekhnologicheskie osnovy pretsizionnogo proizvodstva rastenievodcheskoi produktsii: Dis. ... dokt. s.-kh. nauk, 06.01.03* (Information and technological foundations of precision production of plant products, Dr. of Agri. Sci. thesis, 06.01.03), Sankt-Peterburg, 2013, 367 p.

26. Heuvelink G.B.M., Webster R.A., Modelling soil variation: past, present, and future, *Geoderma*, 2001, Vol. 100, Iss. 3/4, pp. 269–301.

27. Hofman D.J. Siegfried C.K., How many sampling points are needed to

- estimate the mean nitrate-N content of agricultural fields? A geostatistical simulation approach with uncertain variograms, *Geoderma*, 2021, Vol. 385, Art. 114816.
28. McBratney A.B., Gruijter J., Bryce A., Pedometrics timeline, *Geoderma*, 2019, Vol. 338, pp. 568–575.
29. McBratney A.B., Minasny B., Stockmann U., Pedometrics, Australia: The University of Sydney, 2018, 713 p.
30. Oliver V.A., Kerry R., Frogbrook Z.L., Sampling in Precision Agriculture, In: M.A. Oliver (Ed.) *Geostatistical Applications for Precision Agriculture*, Dordrecht, 2010, pp. 35–64.
31. Raj E.F.I., Appadurai M., Athiappan K., Precision farming in modern agriculture, In: Smart agriculture automation using advanced technologies: Data analytics and machine learning, cloud architecture, automation and IoT, Singapore: Springer Singapore, 2022, pp. 61–87.
32. The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture – Systems at breaking point. Synthesis report, Rome, 2021, 82 p., DOI: <https://doi.org/10.4060/cb7654en>.
33. Uwiragiye Y., Ngaba M.J.Y., Yang M., Elrys A.S., Chen Z., Zhou J., Spatially Explicit Soil Acidification under Optimized Fertilizer Use in Sub-Saharan Africa, *Agronomy*, 2023, Vol. 13, pp. 632.
34. Xiao S., Ou M., Geng Y., Zhou T., Mapping soil pH levels across Europe: An analysis of LUCAS topsoil data using random forest kriging (RFK), *Soil Use and Management*, 2023, Vol. 39(2), pp. 900–916.

УДК 631.415:631.445.2:631.8

DOI: 10.19047/0136-1694-2025-123-213-240



Ссылки для цитирования:

Васбиева М.Т., Ямалтдинова В.Р. Изменение кислотно-основных свойств дерново-подзолистой почвы во времени и по профилю при длительном использовании удобрений в условиях Предуралья // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2025. Вып. 123. С. 213-240. DOI: 10.19047/0136-1694-2025-123-213-240

Cite this article as:

Vasbieva M.T., Yamaltdinova V.R., Changes in the acid-base properties of soddy-podzol soil with time and along the profile, resulting from long-term use of fertilizers under the conditions of the Cis-Urals, Dokuchaev Soil Bulletin, 2025, V. 123, pp. 213-240, DOI: 10.19047/0136-1694-2025-123-213-240

Благодарность:

Работа выполнена в рамках темы государственного задания № 124020600030-6.

Acknowledgments:

The work was carried out within the framework of the state assignment No. 124020600030-6.

Изменение кислотно-основных свойств дерново-подзолистой почвы во времени и по профилю при длительном использовании удобрений в условиях Предуралья

© 2024 г. М. Т. Васбиева*, В. Р. Ямалтдинова**

*Пермский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Россия,
614532, ул. Культуры, 12, с. Лобаново, Пермский район, Пермский край,*

**<https://orcid.org/0000-0003-4048-6319>, e-mail: vasbieva@mail.ru,*

***<https://orcid.org/0000-0003-2945-0585>,*

e-mail: yamaltdinova2303@gmail.com.

*Поступила в редакцию 09.09.2024, после доработки 04.04.2025,
принята к публикации 03.06.2025*

Резюме: Показано влияние длительного использования органической, минеральной и органоминеральной систем удобрения, выровненных по элементам питания (контроль – без удобрений; навоз КРС 10 и 20 т/га в

год; NPK эквивалентно 10 и 20 т навоза; навоз 5, 10 и 20 т + NPK эквивалентно 5, 10 и 20 т навоза) на изменение обменной (pH_{KCL}), гидролитической кислотности (H_2), суммы обменных оснований (S) и степени насыщенности почвы основаниями (V). Исследования проведены в полевом опыте 1969–1970 гг. закладки в Пермском НИИСХ – филиале ПФИЦ УрО РАН на дерново-слабоподзолистой тяжелосуглинистой почве. Севооборот полевой восьмипольный. Данные представлены по ротациям севооборота (1969–2017 гг.) в пахотном слое почвы и на конец VI ротации (2016–2017 гг.) в метровом слое. Влияние удобрений на свойства почвы изучено на фоне известкования (в дозе 1.0 H_2), которое было проведено в пару первой ротации. Наибольшую эффективность известкования наблюдали в первые две ротации севооборота, с III ротации отмечено постепенное ухудшение показателя pH_{KCL} , H_2 , S и V по всем вариантам опыта, темпы изменения существенно отличались в зависимости от используемой системы удобрения. Насыщенность пашни навозом КРС 20 т/га в год обеспечивала в III–VI ротациях как минимум поддержание изученных свойств почвы на исходном уровне (до известкования) или способствовала их улучшению (отмечено уменьшение H_2 и увеличение V), насыщенность навозом 10 т/га в год сдерживала темпы подкисления почвы (ухудшение показателя кислотности было менее выражено, чем в контрольном варианте). Положительное влияние использования навоза на показатель pH_{KCL} , H_2 и V наблюдали в основном в слое почвы 0–40 см. Применение минеральной системы удобрений привело к подкислению почвы и уменьшению V . Показатель pH_{KCL} , H_2 и V в варианте “NPK экв. 20 т/га навоза” в V–VI ротациях были существенно ниже исходного уровня (pH_{KCL} до известкования – 5.5, II ротация – 5.9, V–VI ротация – 4.5–4.6; H_2 – 3.1, 2.5 и 3.7–4.4 смоль(экв)/кг; V – 84, 90, 80–82% соответственно). Отрицательное влияние минеральных удобрений на показатель pH_{KCL} , H_2 и V при насыщенности NPK экв. 20 т/га навоза ($N_{70}P_{50}K_{100}$ в год) наблюдали в метровом слое, NPK экв. 10 т/га навоза ($N_{35}P_{25}K_{50}$ в год) – в пахотном слое. Органоминеральная система удобрений по влиянию на показатели pH_{KCL} , H_2 , S и V занимала промежуточное положение между минеральной и органической, процессы подкисления почвы наблюдались, но они были менее выражены.

Ключевые слова: дерново-подзолистая почва; известкование; минеральные и органические удобрения.

Changes in the acid-base properties of soddy-podzol soil with time and along the profile, resulting from long-term use of fertilizers under the conditions of the Cis-Urals

© 2025 M. T. Vasbieva*, V. R. Yamaltdinova**

Perm Federal Research Center,
Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
12 Cultures Str., Lobanovo 614532, Perm, Russian Federation,
*<https://orcid.org/0000-0003-4048-6319>, e-mail: vasbieva@mail.ru,
**<https://orcid.org/0000-0003-2945-0585>,
e-mail: yamaltdinova2303@gmail.com.

Received 09.09.2024, Revised 04.04.2025, Accepted 03.06.2025

Abstract: The influence of long-term use of organic, mineral and organomineral fertilizer systems leveled by nutrients (control – without fertilizer application; cattle manure 10 and 20 t/ha per year; NPK equivalent to 10 and 20 t of manure; manure 5, 10 and 20 t + NPK equivalent to 5, 10 and 20 tons of manure) on the exchangeable (pH_{KCL}), hydrolytic acidity (Ac_{tot}), the sum of exchangeable bases (S) and the degree of soil saturation with bases (V) is considered. The field experiment was performed in 1969–1970 at the Perm Research Institute of Agriculture, on soddy slightly podzolic heavy loam soil. Field crop rotation included 8 fields. Data are presented for each cycle of crop rotation (1969–2017) in the arable soil layer and at the end of rotation VI (2016–2017) in the meter layer. The effect of fertilizers on soil properties was studied against the background of liming (at a dose of $1.0 Ac_{tot}$), which was carried out in the first rotation. The greatest efficiency of liming was observed in the first two rotations; a gradual deterioration in pH_{KCL} , Ac_{tot} , S and V was noted from the third rotation in all variants of the experiment; the degree of changes differed significantly depending on the fertilizer system used. Application of cattle manure at the rate of 10 t/ha per year restrained the deterioration of the acid-base properties of the soil (relative to the control variant); application of 20 t/ha per year ensured in III–VI rotations at least the maintenance of the studied soil properties at the initial level (before liming) or contributed to their improvement. The positive effect of manure on pH_{KCL} , Ac_{tot} and V indicators was observed mainly in the soil layer of 0–40 cm. The use of a mineral fertilizer system led to acidification of the soil and a decrease in V . The pH_{KCL} , Ac_{tot} and V indicators in the “NPK eq. 20 t/ha of manure” in V–VI rotations were significantly lower than the initial level (pH_{KCL} before

liming – 5.5, II rotation – 5.9, V–VI rotation – 4.5–4.6; Ac_{tot} – 3.1, 2.5 and 3.7–4.4 cmol(eq)/kg; V – 84, 90, 80–82%, respectively). The adverse effect of mineral fertilizers on pH_{KCL} , Ac_{tot} and V after application of NPK eq. 20 t/ha of manure ($N_{70}P_{50}K_{100}$ per year) was observed in a meter layer, NPK eq. 10 t/ha of manure ($N_{35}P_{25}K_{50}$ per year) – in the arable layer. The organomineral fertilizer system occupied an intermediate position between mineral and organic ones in terms of its effect on pH_{KCL} , Ac_{tot} , S and V; processes of soil acidification were observed, but they were less pronounced.

Keywords: soddy-podzolic soil; liming; mineral and organic fertilizers.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема почвенной кислотности имеет огромное значение, поскольку от реакции среды непосредственно зависят практически все происходящие в почвах химические и биологические процессы. Изменение кислотно-основных свойств почвы в результате сельскохозяйственного использования определяется выносом полевыми культурами кальция, магния, калия, выщелачиванием данных элементов за пределы пахотного слоя в условиях промывного водного режима, типом сельскохозяйственных угодий, рельефом, использованием различных агрохимикатов, загрязнением окружающей среды (Шихова, Чеглакова, 2022; Бобраков, Ушаков, 2024; Иванов, Рублюк, 2024). Сильная кислотность почвы является одной из причин недостаточной эффективности удобрений (Завалин и др., 2022). Основным способом улучшения показателей почвенной кислотности является известкование, нейтрализация кислотности приводит к существенным изменениям в показателях эффективного плодородия (Аканова, Шильников, 2018; Окорков и др., 2023; Литвинович и др., 2024). Влияние удобрений на кислотно-основные свойства почвы может меняться в зависимости от их вида, сочетания, доз, периодичности, длительности внесения, проведения известкования и целого комплекса сопутствующих факторов (Бортник и др., 2023; Волкова и др., 2024; Kalkhoran et al.,

2020). В работе Л.Н. Шиховой и О.А. Чеглаковой (2022) показано, что применение НРК в возрастающих дозах (от 30 до 150 кг д. в./га) в течение 45 лет привело к достоверному увеличению всех видов кислотности почвы пахотного слоя. С начала опыта величина гидролитической кислотности возросла на 0.3–1.5 мг-экв./100 г почвы, обменной кислотности – на 0.2–0.5 ед. pH_{KCL} в зависимости от вносимой дозы удобрений. Отрицательное влияние НРК на кислотность почв, в первую очередь, объясняют использованием и включением в состав физиологически кислых азотных удобрений. Фосфорные удобрения, по мнению некоторых исследователей, могут оказывать благоприятное воздействие на кислотно-основные свойства почвы за счет содержащихся в них кальция, магния и кремния (Минеев, Гомонова, 2009), другие говорят об отсутствии влияния (Васбиева и др., 2022) или об отрицательном воздействии (Лыскова, 2017; Окорков и др., 2021). Многолетними исследованиями на серых лесных среднесуглинистых почвах Верхневолжья установлено повышение гидролитической кислотности от водорастворимых фосфорных удобрений (в составе РК и НРК) за счет специфической адсорбции фосфатов минеральной частью поглощающего комплекса и вытеснения ионов водорода (Окорков и др., 2021). В работе И.В. Лысковой (2017) показано, что длительное внесение на дерново-подзолистой почве возрастающих доз фосфорных удобрений (100, 150, 200 кг д. в./га) на фоне $N_{90}K_{90}$ привело к росту обменной (с 1.12 до 1.58–1.75 мг-экв/100 г) и гидролитической кислотности (с 6.7 до 7.9–8.3 мг-экв/100 г), содержания подвижных форм алюминия (с 9.5 до 13.6–15.4 мг/100 г). Возможно, применение высоких доз фосфорных удобрений усугубляло влияние азотных или азотно-калийных.

Внесение органических удобрений считают одним из

приемов снижения почвенной кислотности (Лапа, Кулеш, 2015; Чеботарев, Броварова, 2022; Зинякова и др., 2024), при этом эффективность зависит от дозы, длительности внесения и свойств почвы. Например, в исследованиях Н.А. Пеговой (2017) внесение навоза на дерново-подзолистой среднесуглинистой почве в дозе 60 т/га 1 раз в ротацию севооборота не оказало существенного влияния на показатели кислотности почвы. В работе Р.А. Афанасьева и Г.Е. Мёрзлой (2021) показано, что при использовании органической системы удобрения (подстилочный навоз крупного скота натуральной влажности в среднегодовой дозе 9 т/га) на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве наблюдали увеличение кислотности почвы относительно исходного уровня.

Цель исследований – оценить влияние использования минеральной, органической и органоминеральной систем удобрения, выровненных по элементам питания, на показатели кислотности дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы в условиях длительного опыта по ротациям севооборота и по профилю почвы.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводили на опытном поле Пермского НИИСХ (филиал ПФИЦ УрО РАН) в длительном полевом опыте на дерново-слабоподзолистой тяжелосуглинистой почве. Изучали органическую, минеральную и органоминеральную системы удобрений, выровненные по элементам питания. Схема исследований: 1) без удобрений (контроль); 2) навоз 10 т/га в год; 3) навоз 20 т/га в год; 4) NPK эквивалентно 10 т навоза; 5) NPK эквивалентно 20 т навоза; 6) навоз 5 т + NPK эквивалентно 5 т навоза; 7) навоз 10 т + NPK эквивалентно 10 т навоза; 8) навоз 20 т + NPK эквивалентно 20 т навоза. Повторность вариантов четырехкратная, размещение рендомизированное. Опыт поставлен в двух последовательных во времени закладках (1969 г., 1970 г.). Общая площадь делянки 115.5 м². Исследования проводили в полевом восьми-

польном севообороте с чередованием культур: пар чистый, озимая рожь, яровая пшеница с подсевом клевера, клевер 1-го года пользования (г. п.), клевер 2-го г. п., ячмень, картофель, овес. Изучаемая схема в опыте сложилась со второй ротации севооборота (1977–1978 гг.), поэтому данные представлены за II–VI ротации.

Навоз КРС вносили в севообороте в два приема: под рожь и картофель (разовые дозы составили 20, 40 и 80 т/га). Минеральные удобрения, рассчитанные по эквивалентному содержанию в навозе, распределяли, в зависимости от количества, под озимую рожь, пшеницу, ячмень, картофель и овес. Клевер не удобряли, учитывали последствие. За пять ротаций севооборота (II–VI ротации) с навозом при насыщенности пашни 10 т/га в год в почву поступило N – 1 400, P – 950, K – 2 070 кг/га ($N_{35}P_{25}K_{50}$ в год), при насыщенности 20 т/га – 2 800, 1 900 и 4 140 кг/га ($N_{70}P_{50}K_{100}$ в год) соответственно. Солома после уборки зерновых культур во всех вариантах опыта до 2013 г. отчуждалась, с 2014 г. солома измельчалась комбайном и запахивалась. Формы удобрений – аммонийная селитра или мочевина, двойной или простой суперфосфат, калий хлористый.

Агрохимическая характеристика почвы до закладки опыта: содержание $C_{орг}$ 1.3%, pH_{KCL} – 5.5, H_2 – 3.1 смоль(экв)/кг, S – 16.4 смоль(экв)/кг, подвижного P и K по Кирсанову – 162 и 173 мг/кг соответственно. Почвообразующая порода – бурая некарбонатная покровная глина. Характерной особенностью почвы, сформированной на богатых в минералогическом отношении пермских глинах, является высокое содержание обменных форм кальция и магния, которое увеличивается с глубиной, как и сумма поглощенных оснований.

Отбор образцов почв в опыте проводили систематически, осенью, после окончания ротации севооборота в пахотном слое (0–20 см) или по слоям до глубины 1 м (0–20, 20–40, 40–60, 60–80 и 80–100 см). Отбирали индивидуальные образцы в 3–5 точках на каждой делянке, образцы смешивали. Изучение агрохимических свойств почвы проводили в соответствии с ГОСТами и методиками ЦИНАО, статистическую обработку результатов – с использованием Microsoft Excel.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В опыте в пару первой ротации севооборота было проведено известкование (в дозе 1.0 H_2), было отмечено в слое почвы 0–20 см существенное улучшение показателя pH_{KCL} , уменьшение гидролитической кислотности, увеличение суммы обменных оснований и насыщенности почв основаниями (рис. 1–4). Наибольшее положительное влияние известкования наблюдали в первые две ротации (1969–1986 гг.), с III ротации отмечено ухудшение показателей обменной и потенциальной кислотности почвы относительно исходного уровня. Показатель pH_{KCL} в пахотном слое почвы в контрольном варианте в III–IV ротациях уменьшился до 5.2–5.3, в V–VI ротациях до 4.9 (pH_{KCL} при закладке опыта до известкования – 5.5). Гидролитическая кислотность почвы в III–VI ротациях севооборота варьировала в пределах 2.8–3.1 смоль(экв)/кг почвы и стала близка к исходной величине (H_2 при закладке опыта до известкования – 3.1).

Срок положительного влияния известкования зависит от кислотности почвы, чем кислее почва, тем меньше период действия. По данным В.Г. Минеева и Н.Ф. Гомоновой (2014), на дерново-подзолистой сильнокислой почве (показатель pH_{KCL} при закладке опыта до известкования – 4.4) срок возвращения почвы к первоначальному уровню кислотности после первого известкования составил 3 года, после второго – 5 лет, третьего – 6–7 лет, четвертого – 11 лет. Почва в нашем опыте до внесения извести характеризовалась слабокислой реакцией среды и повышенной степенью насыщенности основаниями, что обеспечило более длительное действие извести.

По данным Е.М. Митрофановой (2015), изучавшей вопросы известкования в Пермском крае (на почве близкой по характеристикам в представленном опыте), наибольшее

подкисление пахотного слоя после внесения извести наблюдали в течение первой ротации полевого севопольного севооборота (пар чистый, озимая рожь, яровая пшеница с подсевом клевера, клевер 1-го г.п., клевер 2-го г. п., ячмень, овес). В вариантах с дозами извести 0.5–1.0 H_2 в конце I ротации севооборота снижение сдвига рН от максимально достигнутого уровня составляло 57–50%. Через 30 лет после внесения извести сдвиг рН от максимально достигнутого уровня в вариантах с дозами 0.5 и 1.0 H_2 составил 21–14%. В нашем опыте уменьшение показателя pH_{KCL} в пахотном слое почвы до исходного уровня отмечено уже к концу III ротации севооборота (через 24 года), что возможно связано с другим типом севооборота.

Сумма обменных оснований в контрольном варианте опыта после известкования в течение II–VI ротаций севооборота в слое почвы 0–20 см варьировала в пределах 18.4–19.6 смоль(экв)/кг), уменьшения до исходного уровня не наблюдали (S при закладке опыта до известкования – 16.4 смоль(экв)/кг). Большие запасы валового содержания кальция и магния в исследуемой дерново-подзолистой почве могут являться основной причиной стабильности суммы обменных оснований в почве (Попова и др., 2013).

Степень насыщенности почв основаниями после известкования в конце II ротации составила 89 (до закладки – 84), в течение III–VI ротации варьировала в пределах 86–87%.

Применение минеральной системы удобрений (“NPK экв. 10 и 20 т/га навоза”) привело к постепенному подкислению почвы.

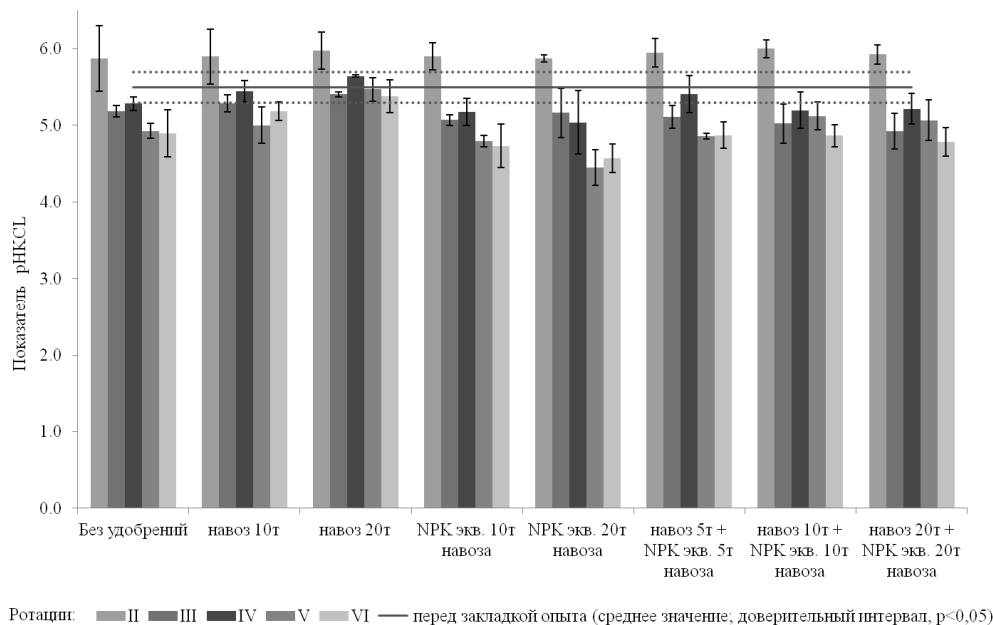


Рис. 1. Изменение обменной кислотности (pH_{KCL}) в пахотном слое дерново-подзолистой почвы по ротациям севооборота при длительном применении различных систем удобрений (1977–2017 гг.).

Fig. 1. Variation of exchangeable acidity (pH_{KCL}) in the arable layer of sod-podzolic soil according to crop rotations with long-term use of various fertilizer systems (1977–2017).

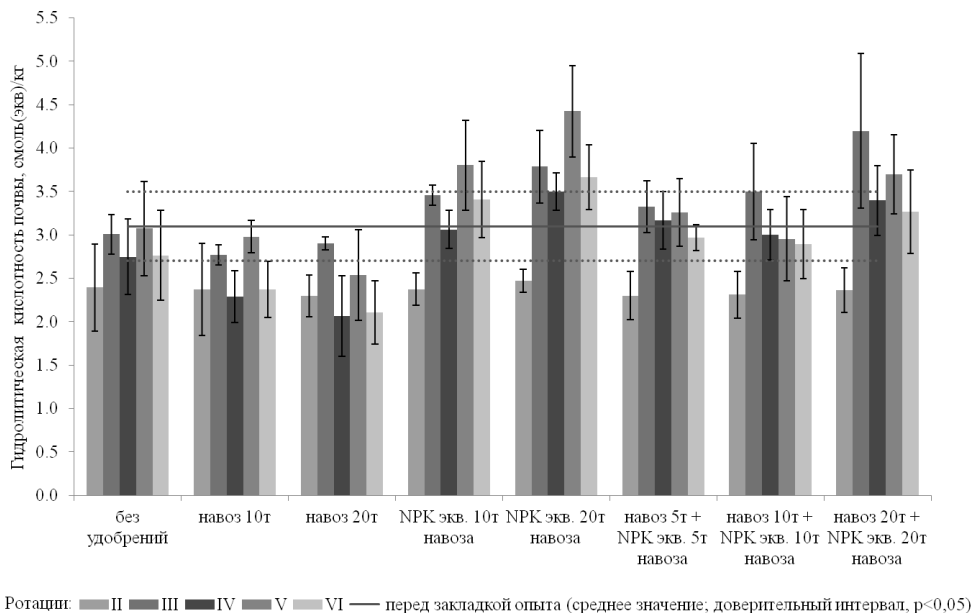


Рис. 2. Изменение гидролитической кислотности в пахотном слое дерново-подзолистой почвы по ротациям севооборота при длительном применении различных систем удобрений (1977–2017 гг.).

Fig. 2. Variation of hydrolytic acidity (Ac_{tot}) in the arable layer of sod-podzolic soil according to crop rotations with long-term use of various fertilizer systems (1977–2017).

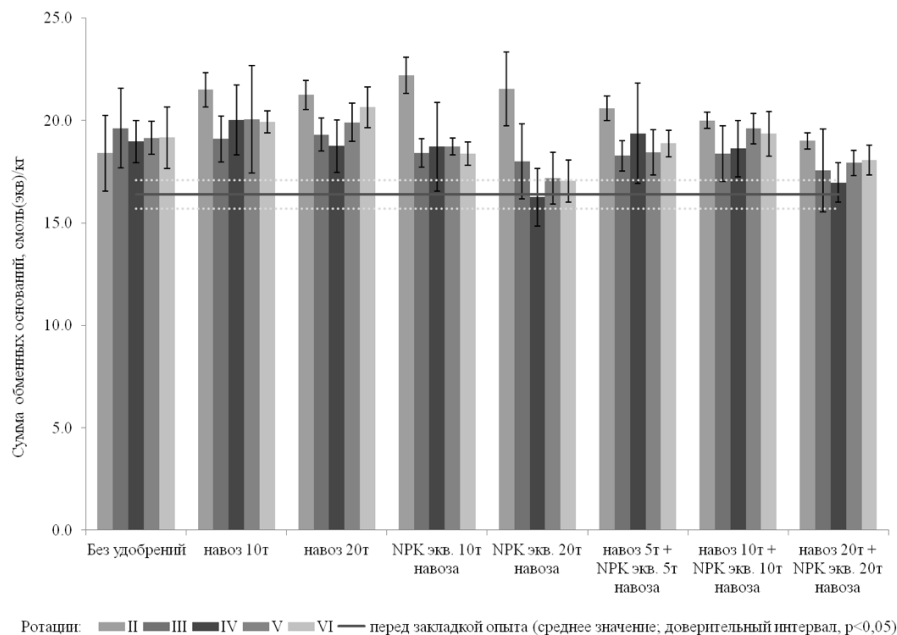


Рис. 3. Изменение суммы обменных оснований в пахотном слое дерново-подзолистей почвы по ротациям севооборота при длительном применении различных систем удобрений (1977–2017 гг.).

Fig. 3. Variation of the sum of exchangeable bases (S) in the arable layer of sod-podzolic soil according to crop rotations with long-term use of various fertilizer systems (1977–2017).

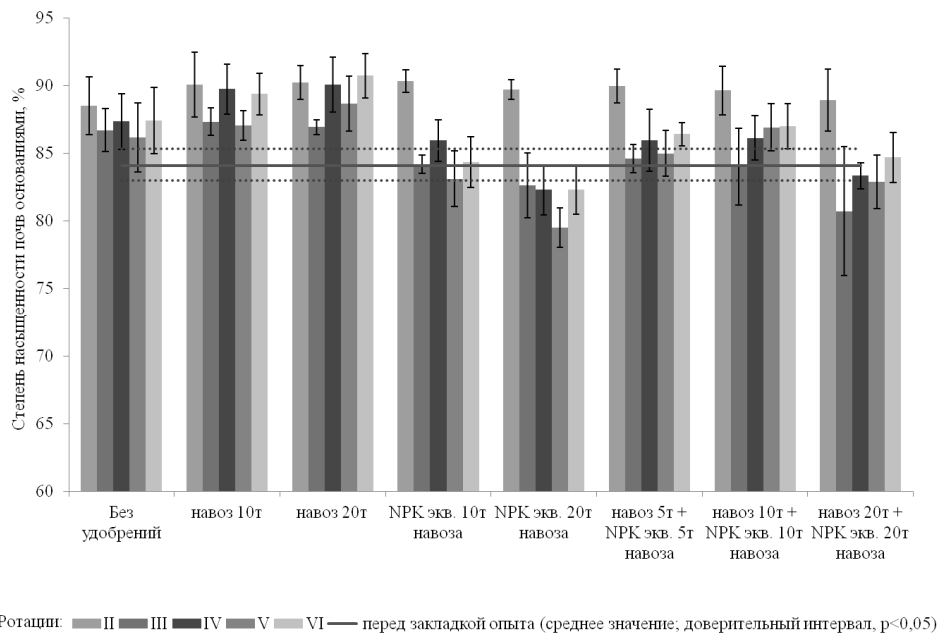


Рис. 4. Изменение степени насыщенности основаниями в пахотном слое дерново-подзолистой почвы по ротациям севооборота при длительном применении различных систем удобрений (1977–2017 гг.).

Fig. 4. Variation of the degree of soil saturation with bases (V) in the arable layer of sod-podzolic soil according to crop rotations with long-term use of various fertilizer systems (1977–2017).

Положительное влияние известкования в данных вариантах наблюдали в первые две ротации, с III ротации отмечено увеличение H_2 почвы, уменьшение показателей pH_{KCL} , S и V , как относительно исходного уровня, так и контрольного варианта. Гидролитическая кислотность в пахотном слое почвы в отдельные ротации увеличивалась до 3.8–4.4 смоль(экв)/кг почвы, показатель pH_{KCL} снижался до 4.5. Сумма обменных оснований в варианте “NPK экв. 20 т/га навоза” в IV ротации уменьшилась до исходного значения (16.4 смоль(экв)/кг). Степень насыщенности почвы основаниями при использовании минеральных удобрений к концу III ротации снизилась с 90 до 84%, в варианте “NPK экв. 20 т/га навоза” в IV–VI ротациях – до 80–82%.

Применение органической системы удобрений оказывало положительное влияние на кислотно-основные свойства почвы в течение всех шести ротаций севооборота. Эффективность известкования при использовании навоза так же, как и в вариантах с минеральной системой удобрений, уменьшается с III ротации севооборота, однако темпы существенно ниже. Показатель pH_{KCL} в варианте навоз 10 т/га в год был выше контрольного варианта и в III–VI ротациях варьировал от 5.0 до 5.4, в варианте навоз 20 т/га в год отмечено поддержание данного показателя на исходном уровне (5.5–5.6). Гидролитическая кислотность почвы при применении навоза в обоих вариантах была меньше, как исходного уровня, так и контрольного варианта. Наибольшее положительное влияние на данный показатель отмечено в варианте навоз 20 т/га в год, здесь в IV–VI ротациях H_2 пахотного слоя почвы варьировала от 2.1 до 2.5 смоль(экв)/кг (контрольный вариант – 2.7–3.1; навоз 10 т/га в год – 2.3–3.0 смоль(экв)/кг). Варьирование показателей кислотности по ротациям можно объяснить качеством поступающего органического материала, длительностью использования навоза, сезонной составляющей и пространственной неоднородностью почвенного покрова. Сумма обменных оснований почвы в вариантах с навозом была выше исходного уровня и контрольного варианта, в V–VI ротациях наблюдали увеличение S до 19.9–20.7 смоль(экв)/кг – максимальные значения данного показателя в опыте в слое почвы 0–20 см. Степень насыщенности почв основаниями при

насыщенности почвы навозом 10 и 20 т/га в год варьировала по ротациям севооборота в пределах 87–91%.

Положительное влияние органических удобрений на кислотно-основные свойства почвы можно объяснить содержанием в них кальция и магния. Органические удобрения улучшают водопроницаемость почвы, в результате чего подавляются восстановительные процессы, ведущие к образованию токсичных Mn^{2+} и Fe^{2+} , и усиливается вымывание токсичных элементов из пахотного слоя. Длительное внесение органических удобрений повышает содержание органического вещества, что также положительно влияет на показатели кислотности почвы (Попова и др., 2013).

Органоминеральная система удобрений по влиянию на показатели кислотности почвы, S и V занимала промежуточное положение. Здесь также наблюдали уменьшение показателя pH_{KCL} , S , V и увеличение H_2 , как и при внесении минеральных удобрений в эквивалентных количествах, но менее интенсивно. Похожие результаты отмечены в работах (Попова и др., 2013; Чебаторев, Броварова, 2022; Ye et al., 2022).

Изучение влияния систем удобрения на кислотно-основные свойства почвы в метровом слое были проведены в конце VI ротации. Отрицательное влияние минеральных удобрений на показатели кислотности почвы, S и V в варианте “NPK экв. 20 т/га навоза” наблюдали в метровом слое, в варианте “NPK экв. 10 т/га навоза” – только в пахотном слое (табл. 1).

Таблица 1. Изменение показателей кислотности, суммы обменных оснований и степени насыщенности основаниями по профилю почвы при длительном применении различных систем удобрений (VI ротация, 2016–2017 гг.)

Table 1. Variation of soil acidity, sum of exchangeable bases, base saturation degree in the arable layer of sod-podzolic soil according to crop rotations with long-term use of various fertilizer systems (1977–2017)

Вариант	Показатель / глубина (см)				
	0–20	20–40	40–60	60–80	80–100
pH _{KCL}					
Без удобрений	4.9	4.8	4.8	4.8	4.8
Навоз 10 т/га	5.2	5.1	5.0	5.0	4.9
Навоз 20 т/га	5.4	5.2	5.1	5.0	4.8
НПК экв. 10 т навоза	4.7	4.9	4.8	4.7	4.9
НПК экв. 20 т навоза	4.6	4.7	4.6	4.3	4.3
Навоз 5 т+НПК экв.	4.9	5.0	4.9	4.8	4.5
Навоз 10 т + НПК экв.	4.9	4.9	4.8	4.8	4.8
Навоз 20 т + НПК экв.	4.8	5.0	5.0	4.9	4.7
НСП ₀₅	0.1	0.3	0.3	0.3	0.4

Продолжение таблицы 1
Table 1 continued

Вариант	Показатель / глубина (см)				
	0–20	20–40	40–60	60–80	80–100
<i>H₂</i> , смоль(экв)/кг					
Без удобрений	2.8	2.2	2.0	1.9	1.9
Навоз 10 т/га	2.4	1.9	1.8	1.8	1.8
Навоз 20 т/га	2.1	1.8	1.8	1.8	1.9
НПК экв. 10 т навоза	3.4	2.4	2.0	1.9	1.9
НПК экв. 20 т навоза	3.7	2.5	2.2	2.8	2.6
Навоз 5 т+НПК экв.	3.0	2.3	2.1	2.0	2.2
Навоз 10 т + НПК экв.	2.9	2.2	2.2	2.1	2.0
Навоз 20 т + НПК экв.	3.3	2.5	2.2	2.4	2.4
НСП ₀₅	0.3	0.3	0.2	0.4	0.4

Продолжение таблицы 1
Table 1 continued

Вариант	Показатель / глубина (см)				
	0–20	20–40	40–60	60–80	80–100
S, смоль(экв)/кг					
Без удобрений	19.6	22.6	24.8	25.9	25.8
Навоз 10 т/га	19.9	23.7	20.2	26.7	26.5
Навоз 20 т/га	20.7	23.3	26.4	26.8	27.3
НПК экв. 10 т навоза	18.4	23.1	25.7	27.5	27.9
НПК экв. 20 т навоза	17.1	22.3	25.6	26.3	26.3
Навоз 5 т+НПК экв.	18.9	21.6	27.0	26.3	27.1
Навоз 10 т + НПК экв.	19.4	24.0	28.1	27.3	28.0
Навоз 20 т + НПК экв.	18.1	20.7	24.6	26.7	26.5
НСП ₀₅	1.5	$F_{\phi} < F_T$	$F_{\phi} < F_T$	$F_{\phi} < F_T$	$F_{\phi} < F_T$

Продолжение таблицы 1
Table 1 continued

Вариант	Показатель / глубина (см)				
	0–20	20–40	40–60	60–80	80–100
V, %					
Без удобрений	90	91	93	93	93
Навоз 10 т/га	91	93	92	94	94
Навоз 20 т/га	92	93	94	94	93
НПК экв. 10 т навоза	88	90	93	94	94
НПК экв. 20 т навоза	85	90	92	90	91
Навоз 5 т+НПК экв.	88	91	93	93	92
Навоз 10 т + НПК экв.	88	92	93	93	93
Навоз 20 т + НПК экв.	85	89	92	92	92
НСП ₀₅	2	2	$F_{\phi} < F_T$	2	2

Полученные результаты, в первую очередь, обусловлены более высокой насыщенностью пашни азотными, а также, возможно, калийными удобрениями в варианте “NPK экв. 20 т/га навоза”. Установлено, что сочетание азотных удобрений с калием хлористым оказывает более сильное отрицательное влияние на физико-химические свойства почвы, чем применение азотных удобрений в чистом виде (Vasbieva et al., 2022).

Ухудшение показателей кислотности также может быть связано с количеством азота удобрений, не используемого культурами, т. е. избыточного. Считается, что имеет значение не только доза азотных удобрений, но и обеспечение благоприятных условий для проявления их эффективности.

По данным А.И. Иванова (2000), на окультуренных дерново-подзолистых почвах хозяйственный вынос азота культурами севооборота находился в пределах 110–130 кг/га, поэтому доза азотного удобрения 120 кг д. в./га не вызывала существенного роста кислотности почвы по отношению к контролю за 12 лет применения. Баланс азота по результатам наших исследований в варианте “NPK экв. 10 т/га навоза” ($N_{35}P_{25}K_{50}$ в год) сложился отрицательный (-38 кг/га), в варианте “NPK экв. 20 т/га навоза” ($N_{70}P_{20}K_{100}$ в год) – близкий к нулевому (табл. 2). При этом отрицательное влияние минеральных удобрений на показатели кислотности почвы наблюдали в обоих вариантах. Возможно, это связано с невысоким коэффициентом использования азота из удобрений (расчетный метод), который по ротациям варьировал в варианте “NPK экв. 10 т/га навоза” от 32 до 60%, в варианте “NPK экв. 20 т/га навоза” – от 10 до 29%.

Положительное влияние навоза (насыщенность 10 и 20 т/га в год) на показатель pH_{KCL} и V относительно контрольного варианта наблюдали в слое 0–40 см, H_2 – в слое 0–60 см.

Таблица 2. Хозяйственный баланс азота в опыте, кг/га в среднем в год (среднее по 2 закладкам, 1977–2017 гг.)

Table 2. Balance of nitrogen in the experiment, kg/ha on average per year (average for 2 experiment layings, 1977–2017)

Вариант	Поступление азота с удобрениями	Хозяйственный вынос	Баланс, ±
Без удобрений	-	58	-58
Навоз 10 т/га	36	69	-33
Навоз 20 т/га	71	73	-1
НРК экв. 10 т навоза	36	74	-38
НРК экв. 20 т навоза	71	78	-7
Навоз 5 т + НРК экв.	39	74	-35
Навоз 10 т + НРК экв.	74	80	-5
Навоз 20 т + НРК экв.	144	83	61

Достоверные изменения по профилю почвы при использовании органоминеральной системы удобрения наблюдали только в варианте с максимальной насыщенностью пашни удобрениями (навоз 20 т/га в год + НРК экв. навозу). Здесь отмечено увеличение H_2 в метровом слое и уменьшение V в слое 0–40 см.

Существенных изменений по профилю почвы в содержании обменной формы кальция и магния в результате длительного использования различных систем удобрения относительно контрольного варианта в опыте не выявлено. Только в вариантах “НРК экв. 20 т/га навоза” и “навоз 20 т/га + НРК экв. навозу” наблюдали достоверное уменьшение в пахотном слое почвы содержания обменных соединений кальция с 16.8 до 14.3–14.6 смоль(экв)/кг (на 13–15%) ($HCp_{05} = 1.2$ смоль(экв)/кг).

ВЫВОДЫ

Известкование (доза 1.0 H_2) дерново-слабоподзолистой тяжелосуглинистой почвы, сформированной на желто-бурой покровной глине, обеспечило существенное улучшение кислотности почвы, увеличение S и V . Наибольшую эффективность известкования наблюдали в течение первых двух ротаций полевого восьмипольного севооборота, с III ротации отмечено постепенное ухудшение кислотно-основных свойств почвы по всем вариантам опыта. При этом темпы существенно отличались в зависимости от используемой системы удобрения. Применение органической системы удобрений оказывало положительное влияние на кислотно-основные свойства почвы. Насыщенность пашни навозом КРС 20 т/га в год как минимум обеспечивала поддержание изученных свойств почвы на исходном уровне (до известкования) или способствовала их улучшению. Положительное влияние использования навоза на показатели кислотности почвы и V наблюдали в основном в слое 0–40 см. Применение минеральной системы удобрений привело к подкислению почвы и уменьшению V . Значения обменной, гидролитической кислотности и степени насыщенности почвы основаниями в варианте “NPK экв. 20 т/га навоза” в V–VI ротациях были существенно ниже исходного уровня. Отрицательное влияние минеральных удобрений на кислотно-основные свойства в варианте “NPK экв. 20 т/га навоза” наблюдали в метровом слое; в варианте “NPK экв. 10 т/га навоза” – только в пахотном слое. Органоминеральная система удобрений по влиянию на кислотность почвы, S и V занимала промежуточное положение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аканова Н.И., Шильников И.А. Проблема химической мелиорации почв в земледелии Российской Федерации // Плодородие. 2018. № 2(101). С. 9–11.
2. Афанасьев Р.А., Мерзлая Г.Е. Сравнительная эффективность систем удобрения // Агрохимия. 2021. № 2. С. 31–36. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002188121020034>.
3. Бобраков Ф.Ю., Ушаков Р.Н. Мониторинг состояния кислотности

агросерой почвы и биодиагностика ее устойчивости к подкислению // Плодородие. 2024. № 2(137). С. 31–35. DOI: <https://doi.org/10.25680/S19948603.2024.137.08>.

4. Бортник Т.Ю., Карпова А.Ю., Клековкин К.С. Агроэкологическое состояние дерново-среднеподзолистой среднесуглинистой почв после 40-летнего применения различных систем удобрения // Агрохимический вестник. 2023. № 1. С. 3–10. DOI: <https://doi.org/10.24412/1029-2551-2023-1-001>.

5. Васбиева М.Т., Завьялова Н.Е., Шишков Д.Г. Изменение агрохимических свойств дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы при длительном применении азотных, фосфорных и калийных удобрений в условиях Предуралья // Почвоведение. 2022. № 11. С. 1415–1425. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0032180X22110132>.

6. Волкова Е.С., Шайкова Т.В., Дятлова М.В. Эффективность азотных удобрений и биопрепаратов под озимую рожь на дерново-подзолистой почве разной степени окультуренности // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2024. № 119. С. 139–171. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2024-119-139-171>.

7. Завалин А.А., Киртичников Н.А., Бижан С.П. Эффективность применения биомодифицированных минеральных удобрений под ячмень при различной кислотности дерново-подзолистой почвы // Вестник российской сельскохозяйственной науки. 2022. № 2. С. 65–68. DOI: <https://doi.org/10.30850/vrsn/2022/2/65-68>.

8. Зинякова Н.Б., Соколов Д.А., Лебедева Т.Н., Удальцов С.Н., Семенов В.М. Влияние многолетнего применения минеральных удобрений и навоза на агрохимические свойства серой лесной почвы, продуктивность культур и секвестрацию углерода // Агрохимия. 2024. № 4. С. 14–34. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002188124040033>.

9. Иванов А.И. Почвенно-агрохимическое обоснование системы удобрения на хорошо окультуренных дерново-подзолистых почвах Северо-Запада России: Дис. ... докт. сельскохозяйственных наук: 06.01.04. Санкт-Петербург, 2000. 295 с.

10. Иванов Д.А., Рублюк М.В. Динамика гидролитической кислотности почв в агроландшафте // Агрохимический вестник. 2024. № 2. С. 40–45. DOI: <https://doi.org/10.24412/1029-2551-2024-2-008>.

11. Лапа В.В., Кулеш О.Г. Роль уровня почвенной кислотности и условий питания в изменении агрохимических свойств дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы // Почвоведение и агрохимия. 2015. № 1(54). С. 140–150.

12. Литвинович А.В., Нельсон К.М., Лаврищев А.В., Манаков П.С. Влияние удобрений и мелиорантов на величину почвенной кислотности

дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы, урожайность и химический состав зеленой массы ярового рапса (по данным лабораторно- вегетационного опыта) // Агрохимия. 2024. № 5. С. 37–44. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002188124050055>.

13. *Лыскова И.В.* Влияние минеральных удобрений на плодородие дерново-подзолистой почвы, урожайность и качество зерновых культур // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2017. № 6(61). С. 35–40. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2017.61.6.35-40>.

14. *Минеев В.Г., Гомонова Н.Ф.* Значение фосфора в улучшении свойств дерново-подзолистой почвы при действии и последствии длительного применения минеральных удобрений // Проблемы агрохимии и экологии. 2009. № 2. С. 3–9.

15. *Минеев В.Г., Гомонова Н.Ф.* Периодичность известкования при окультуривании дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. 2014. № 1. С. 37–41.

16. *Митрофанова Е.М.* Влияние известкования и минеральных удобрений на кислотность дерново-подзолистой почвы Предуралья // Агрохимия. 2015. № 7. С. 3–10.

17. *Окорков В.В., Окоркова Л.А., Коновалова Л.К.* Серые лесные почвы Владимирского ополья, их формирование и оценка ресурсногопотенциала: удобрение и питание полевых культур. Суздаль-Воронеж: МИНОБРНАУКИ РФ, ФГБНУ “Верхневолжский ФАНЦ”, 2023. 241 с.

18. *Окорков В.В., Окоркова Л.А., Фенова О.А.* Влияние длительного применения удобрений на изменение физико-химических свойств серой лесной почвы Верхневолжья // Владимирский земледелец. 2021. № 2(96). С. 27–34. DOI: <https://doi.org/10.24412/2225-2584-2021-2-27-34>.

19. *Пегова Н.А.* Влияние систем обработки и биоресурсов на агрохимические свойства дерново-подзолистой суглинистой почвы // Вестник российской сельскохозяйственной науки. 2017. № 6. С. 31–35.

20. *Попова С.И., Митрофанова Е.М., Зиганьшина Ф.М.* Известкование кислых почв в Предуралье. Пермь: Издательство “От и До”, 2013. 252 с.

21. *Чеботарев Н.Т., Броварова О.В.* Влияние длительного применения систем удобрений на свойства почвы и продуктивность севооборотов условиях Европейского Севера России // Агрохимический вестник. 2022. № 5. С. 24–28. DOI: <https://doi.org/10.24412/1029-2551-2022-5-006>.

22. *Шихова Л.Н., Чеглакова О.А.* Изменение кислотности и состава ППК при длительном внесении возрастающих доз минеральных удобрений в дерново-подзолистой почве // Российская сельскохозяйственная наука. 2022. № 6. С. 32–36. DOI: <https://doi.org/10.31857/S2500262722060072>.

23. Kalkhoran S.S., Pannell D.J., Thamo T., Polyakov M., White B. Optimal lime rates for soil acidity mitigation: impacts of crop choice and nitrogen fertiliser in Western Australia // *Crop & Pasture Science*. 2020. Vol. 71. P. 36–46.
24. Vasbieva M.T., Zavyalova N.E., Shishkov D.G. Changes in the Agrochemical Properties of Albic Retisol (Abruptic, Aric, Loamic) during a Long-Term Use of Nitrogen, Phosphorus, and Potassium Fertilizers under Cis-Ural // *Eurasian Soil Science*. 2022. Vol. 55. No. 11. P. 1623–1632. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229322110138>.
25. Ye J., Wang Y., Wang Y., Hong L., Jia X., Kang Ja., Lin Sh., Wu Z., Wang H. Improvement of soil acidification in tea plantations by long-term use of organic fertilizers and its effect on tea yield and quality // *Front Plant Sci*. 2022. Vol. 13. No. 1055900. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1055900>.

REFERENCES

1. Akanova N.I., Shilnikov I.A., Problema khimicheskoy melioratsii pochv v zemledelii Rossiyskoy Federatsii (The problem of chemical soil melioration in agriculture of the Russian Federation), *Plodorodiye*, 2018, No. 2(101), pp. 9–11.
2. Afanasyev R.A., Merzlaya G.E., Sravnitel'naya effektivnost' sistem udobreniya (Comparative efficiency of fertilization systems), *Agrokhimiya*, 2021, No. 2, pp. 31–36, DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002188121020034>.
3. Bobrakov F.Yu., Ushakov R.N., Monitoring sostoyaniya kislotnosti agroseroy pochvy i biodiagnostika yeye ustoychivosti k podkislениyu (Monitoring the acidity state of agro-gray soil and biodiagnostics of its resistance to acidification), *Plodorodiye*, 2024, No. 2(137), pp. 31–35, DOI: <https://doi.org/10.25680/S19948603.2024.137.08>.
4. Bortnik T.Yu., Karpova A.Yu., Klekovkin K.S., Agroekologicheskoye sostoyaniye dernovo-srednepodzolistoy srednesuglinistoy pochvyposle 40-letnego primeneniya razlichnykh sistem udobreniya (Agroecological state of sod-medium podzolic medium loamy soil after 40 years of using various fertilization systems), *Agrokhimicheskiy vestnik*, 2023, No. 1, pp. 3–10, DOI: <https://doi.org/10.24412/1029-2551-2023-1-001>.
5. Vasbieva M.T., Zavyalova N.E., Shishkov D.G., Izmeneniye agrokhimicheskikh svoystv dernovo-podzolistoy tyazhelosuglinistoy pochvy pri dlitel'nom primenении azotnykh, fosfornykh i kaliynykh udobreniy v usloviyakh Predural'ya (Changes in the agrochemical properties of sod-podzolic heavy loamy soil with long-term use of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers in the conditions of the Cis-Urals), *Pochvovedeniye*, 2022, No. 11, pp. 1415–1425, DOI:

<https://doi.org/10.31857/S0032180X22110132>.

6. Volkova E.S., Shaykova T.V., Dyatlova M.V., Efficiency of nitrogen fertilizers and biological preparations for winter rye on soddy-podzolic soil of different cultivation status, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2024, Vol. 119, pp. 139–171, DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2024-119-139-171>.

7. Zavalin A.A., Kirpichnikov N.A., Bizhan S.P., Effektivnost' primeneniya biomodifitsirovannykh mineral'nykh udobreniy pod yachmen' pri razlichnoy kislotnosti dernovo-podzolistoy pochvy (Efficiency of using biomodified mineral fertilizers for barley with different acidity of sod-podzolic soil), *Vestnik rossiyskoy sel'skokhozyaystvennoy nauki*, 2022, No. 2, pp. 65–68, DOI: <https://doi.org/10.30850/vrsn/2022/2/65-68>.

8. Zinyakova N.B., Sokolov D.A., Lebedeva T.N., Udaltsov S.N., Semenov V.M., Vliyaniye mnogoletnego primeneniya mineral'nykh udobreniy i navoza na agrokhimicheskiye svoystva seroy lesnoy pochvy, produktivnost' kul'tur i sekvestratsiyu ugleroda (Effect of long-term use of mineral fertilizers and manure on the agrochemical properties of gray forest soil, crop productivity and carbon sequestration), *Agrokhimiya*, 2024, No. 4, pp. 14–34, DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002188124040033>.

9. Ivanov A.I., *Pochvenno-agrokhimicheskoye obosnovaniye sistemy udobreniya na khorosho okul'turenykh dernovo-podzolistykh pochvakh Severo-Zapada Rossii: Dis. ... dokt. sel'skokhozyaystvennykh nauk: 06.01.04*. (Soil and agrochemical substantiation of the fertilization system on well-cultivated sod-podzolic soils of the North-West of Russia, Dr. Agri. Sci. thesis, 06.01.04), Sankt-Peterburg, 2000, 295 p.

10. Ivanov D.A., Rublyuk M.V., Dinamika gidroliticheskoy kislotnosti pochv v agrolandshafte (Dynamics of hydrolytic acidity of soils in the agricultural landscape), *Agrokhimicheskyy vestnik*, 2024, No. 2, pp. 40–45, DOI: <https://doi.org/10.24412/1029-2551-2024-2-008>.

11. Lapa V.V., Kulesh O.G., Rol' urovnya pochvennoy kislotnosti i usloviy pitaniya v izmenenii agrokhimicheskikh svoystv dernovo-podzolistoy legkosuglinistoy pochvy (The role of soil acidity level and nutrition conditions in changing the agrochemical properties of sod-podzolic light loamy soil), *Pochvovedeniye i agrokhimiya*, 2015, No. 1(54), pp. 140–150.

12. Litvinovich A.V., Nelson K.M., Lavrishchev A.V., Manakov P.S., Vliyaniye udobreniy i meliorantov na velichinu pochvennoy kislotnosti dernovo-podzolistoy legkosuglinistoy pochvy, urozhaynost' i khimicheskyy sostav zelenoy massy yarovogo rapsa (po dannym laboratorno-vegetatsionnogo opyta) (The influence of fertilizers and ameliorants on the value of soil acidity of sod-podzolic light loamy soil, the yield and chemical composition of green mass of spring rape (according to laboratory and vegetation experiment)), *Agrokhimiya*, 2024, No. 5, pp. 37–44, DOI:

<https://doi.org/10.31857/S0002188124050055>.

13. Lyskova I.V., Vliyaniye mineral'nykh udobreniy na plodorodiye dernovo-podzolistoy pochvy, urozhaynost' i kachestvo zernovykh kul'tur (The influence of mineral fertilizers on the fertility of sod-podzolic soil, the yield and quality of grain crops), *Agrarnaya nauka Yevro-Severo-Vostoka*, 2017, No. 6(61), pp. 35–40, DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2017.61.6.35-40>.

14. Mineev V.G., Gomonova N.F., Znachenije fosfora v uluchshenii svoystv dernovo-podzolistoy pochvy pri deystvii i posledeystvii dlitel'nogo primeneniya mineral'nykh udobreniy (The importance of phosphorus in improving the properties of sod-podzolic soils under the effect and aftereffect of long-term use of mineral fertilizers), *Problemy agrokhimii i ekologii*, 2009, No. 2, pp. 3–9.

15. Mineev V.G., Gomonova N.F., Periodichnost' izvestkovaniya pri okul'turivanii dernovo-podzolistoy srednesuglinistoy pochvy (Frequency of liming during cultivation of sod-podzolic medium loamy soil), *Doklady Rossiyskoy akademii sel'skokhozyaystvennykh nauk*, 2014, No. 1, pp. 37–41.

16. Mitrofanova E.M., Vliyaniye izvestkovaniya i mineral'nykh udobreniy na kislotnost' dernovo-podzolistoy pochvy Predural'ya (Effect of liming and mineral fertilizers on the acidity of sod-podzolic soil in the Cis-Urals), *Agrokhiimiya*, 2015, No. 7, pp. 3–10.

17. Okorkov V.V., Okorkova L.A., Konovalova L.K., Seryye lesnyye pochvy Vladimirskogo opol'ya, ikh formirovaniye i otsenka resursnogopotentsiala: udobreniye i pitaniye polevykh kul'tur (Gray forest soils of the Vladimir Opolye, their formation and assessment of resource potential: fertilization and nutrition of field crops), Suzdal'-Voronezh: MINOBRNAUKI RF, FGBNU “Verkhnevolzhskiy FANTS”, 2023, 241 p.

18. Okorkov V.V., Okorkova L.A., Fenova O.A., Vliyaniye dlitel'nogo primeneniya udobreniy na izmeneniye fiziko-khimicheskikh svoystv seroy lesnoy pochvy Verkhnevolzh'ya (The effect of long-term use of fertilizers on changes in the physicochemical properties of gray forest soil of the Upper Volga region), *Vladimirskiy zemledelets*, 2021, No. 2(96), pp. 27–34, DOI: <https://doi.org/10.24412/2225-2584-2021-2-27-34>.

19. Pegova N.A., Vliyaniye sistem obrabotki i bioresursov na agrokhimicheskiye svoystva dernovo-podzolistoy suglinistoy pochvy (The effect of processing systems and bioresources on the agrochemical properties of sod-podzolic loamy soil), *Vestnik rossiyskoy sel'skokhozyaystvennoy nauki*, 2017, No. 6, pp. 31–35.

20. Popova S.I., Mitrofanova E.M., Ziganshina F.M., Izvestkovaniye kislykh pochv v Predural'ye (Liming of acidic soils in the Cis-Urals), Perm': Izdatel'stvo “Ot i Do”, 2013, 252 p.

21. Chebotarev N.T., Brovarova O.V., Vliyaniye dlitel'nogo primeneniya

sistem udobreniy na svoystva pochvy i produktivnost' sevooborotav usloviyakh Yevropeyskogo Severa Rossii (Effect of long-term use of fertilizer systems on soil properties and crop rotation productivity in the conditions of the European North of Russia), *Agrokhimicheskii vestnik*, 2022, No. 5, pp. 24–28, DOI: <https://doi.org/10.24412/1029-2551-2022-5-006>.

22. Shikhova L.N., Cheglakova O.A., Izmeneniye kislotnosti i sostava PPK pri dlitel'nom vnesenii vozrastayushchikh doz mineral'nykh udobreniy v dernovo-podzolistoy pochve (Changes in acidity and composition of the crop-arable complex with long-term application of increasing doses of mineral fertilizers in sod-podzolic soil), *Rossiyskaya sel'skokhozyaystvennaya nauka*, 2022, No. 6, pp. 32–36, DOI: <https://doi.org/10.31857/S2500262722060072>.

23. Kalkhoran S.S., Pannell D.J., Thamo T., Polyakov M., White B., Optimal lime rates for soil acidity mitigation: impacts of crop choice and nitrogen fertiliser in Western Australia, *Crop & Pasture Science*, 2020, Vol. 71, pp. 36–46.

24. Vasbieva M.T., Zavyalova N.E., Shishkov D.G., Changes in the Agrochemical Properties of Albic Retisol (Abruptic, Aric, Loamic) during a Long-Term Use of Nitrogen, Phosphorus, and Potassium Fertilizers under Cis-Ural, *Eurasian Soil Science*, 2022, Vol. 55, No. 11, pp. 1623–1632, DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229322110138>.

25. Ye J., Wang Y., Wang Y., Hong L., Jia X., Kang Ja., Lin Sh., Wu Z., Wang H., Improvement of soil acidification in tea plantations by long-term use of organic fertilizers and its effect on tea yield and quality, *Front Plant Sci.*, 2022, Vol. 13, No. 1055900, DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1055900>.

УДК 631.48

DOI: 10.19047/0136-1694-2025-123-241-272



Ссылки для цитирования:

Варламов Е.Б., Лебедева М.П., Чурилин Н.А., Мусаэлян Р.Э., Колесников А.В., Чурилина А.А. Минералогия солодей в лимане на Джаныбекском стационаре института лесоведения РАН // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2025. Вып. 123. С. 241-272. DOI: 10.19047/0136-1694-2025-123-241-272

Cite this article as:

Varlamov E.B., Lebedeva M.P., Churilin N.A., Musaelyan R. E., Kolesnikov A.V., Churilina A.A. Mineralogy of solods in the estuary at the Dzhanybek stationary site of the Institute of Forestry of the Russian Academy of Sciences., Dokuchaev Soil Bulletin, 2025, V. 123, pp. 241-272, DOI: 10.19047/0136-1694-2025-123-241-272

Благодарность:

Исследования выполнены в рамках плана НИР по теме FGUR 2025-0005-05.3.

Авторы выражают благодарность и признательность начальнику Джаныбекского стационара, ведущему научному сотруднику лаборатории аридного лесоразведения ИЛАН РАН, доктору биологических наук М.К. Сапанову за предоставленную возможность выполнения научных исследований на стационаре. Доктору с.-х. наук Н.Б. Хитрову за консультацию, ценные замечания и помощь при подготовке статьи.

Acknowledgments:

The studies were carried out within the framework of Scientific Research FGUR 2025-0005-05.3.

The authors express their gratitude and appreciation to the head of the Dzhanybek station, leading researcher of the laboratory of arid afforestation of the Institute of Forestry of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Biological Sciences M.K. Sapanov for the opportunity to carry out scientific research at the station. To Khitrov N.B. for consultation, valuable comments and assistance in preparing the article.

**Минералогия солодей в лимане на
Джаныбекском стационаре института
лесоведения РАН**

© 2025 г. Е. Б. Варламов^{1*}, М. П. Лебедева¹, Н. А. Чурилин¹,
Р. Э. Мусаэлян¹, А. В. Колесников², А. А. Чурилина³

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

*<https://orcid.org/0000-0003-0345-9186>, e-mail: evgheni968@rambler.ru.

²Институт лесоведения РАН, Россия,
185910, Московская обл., Одинцовский р-он, с. Успенское,
ул. Советская, д.211.

³НОЦ – Ботанический сад Петра I биологического факультета
МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия,
119991, Москва, Ленинские горы, 1/12.

Поступила в редакцию 05.08.2024, после доработки 05.02.2025,
принята к публикации 03.06.2025

Резюме: Структура почвенного покрова Северного Прикаспия включает межпадинный солонцовый комплекс, почвы пادين и лиманов. Постоянными элементами микрорельефа днища лиманов являются замкнутые округлые микрозападины до 9 м в диаметре. Почвенная комбинация микрозападин представлена солодями лугово-степными с разной мощностью осолоделого горизонта, наибольшей на периферии, наименьшей в днище. Изучено два почвенных разреза: в днище микрозападины – солодь среднemoshная, и на ровной части днища лимана, на краю микрозападины, – солодь глубокая. Меньшая мощность осолодения в днище микрозападины сопровождается более высоким содержанием илистых частиц при одинаковой мощности текстурных и аккумулятивно-карбонатных горизонтов. В обеих почвах установлен однотипный качественный состав глинистых и кластогенных минералов. Выявлена однотипная дифференциация по профилям кластогенных минералов, но степень их выраженности неодинаковая. Более контрастная дифференциация установлена в солоди микрозападины. Содержание полевых шпатов возрастает в нижних горизонтах, кварца, наоборот, – в верхних горизонтах. Происходит дифференциация и глинистых минералов. Иллит накапливается в верхних горизонтах, а содержание хлорита, наоборот, возрастает в нижних горизонтах. В текстурных горизонтах профилей отмечается увеличение смешаннослойных слюда-сметитовых образований и незначительного количества каолинита, которые находятся в супердисперсном состоянии. Снижение роли сметитовой фазы в верхних горизонтах связано с его иллитизацией в обеих солодях. У солоди микрозападины супердисперсность связана с обратной трансформацией иллитовых слоев

в смектитовые, что обеспечивается периодически застойным водным режимом атмосферного питания, при котором мобилизуются продукты химического выветривания в пределах почвенного профиля в виде различных смешаннослойных образований.

Ключевые слова: смектитовая фаза; иллит; смешаннослойные минералы; каолинит; хлорит; кварц; слюды; полевые шпаты.

Mineralogy of solods in the estuary at the Dzhanybek stationary site of the Institute of Forestry of the Russian Academy of Sciences

© 2025 E. B. Varlamov^{1*}, M. P. Lebedeva¹, N. A. Churilin¹,
R. E. Musaelyan¹, A. V. Kolesnikov², A. A. Churilina³

¹Federal Research Centre “V.V. Dokuchaev Soil Science Institute”,
7 Bld. 2 Pyzhevskiy per., Moscow 119017, Russian Federation,
*<https://orcid.org/0000-0003-0345-9186>, e-mail: evgheni968@rambler.ru.

²Institute of Forest Science, Russian Academy of Sciences,
21 Sovetskaya Str., Uspenskoe 143030, Moscow region, Russian Federation.

³Research and Educational Center Botanical Garden of Peter I of
Lomonosov Moscow State University,
1/12 Leninskie Gori, Moscow 119991, Russian Federation.

Received 05.08.2024, Revised 05.02.2025, Accepted 03.06.2025

Abstract: The structure of the soil cover of the Northern Caspian region includes the interdepression solonetz complex, soils of depressions and estuaries. Permanent elements of the microrelief of the estuary bottom are closed rounded microdepressions up to 9 m in diameter. The soil combination of microdepressions is represented by meadow-steppe solods with different thickness of the solodized horizon, the largest on the periphery and the smallest in the bottom. Two soil profiles were studied: in the bottom of the microdepression – medium-thick solod, and on the flat part of the estuary bottom on the edge of the microdepression – deep solod. Less solodization thickness in the bottom of the microdepression is accompanied by a higher content of silt particles with the same thickness of textural and accumulative-carbonate horizons. In both soils, the same type of qualitative composition of clay and clastogenic minerals was established. A uniform differentiation was revealed by the profiles of clastogenic minerals, but the degree of their expression is not the same. The more contrasting differentiation was established in the solod of the microdepression. The content of feldspars

increases in the lower horizons and quartz, on the contrary, in the upper horizons. Differentiation of clay minerals also occurs. Illite accumulates in the upper horizons, and the content of chlorite increases in the lower horizons. In the textural horizons of the profiles, an increase in mixed-layer mica-smectite formations is noted and insignificant kaolinite minerals are fixed in a superdispersed state. A decrease in the role of the smectite phase in the upper horizons is associated with its illitization in both solods. In the solod of the microdepression, superdispersion is associated with the reverse transformation of illite into smectite layers, which is ensured by a periodically stagnant water regime of atmospheric nutrition, in which the products of chemical weathering are mobilized within the soil profile in the form of various mixed-layer formations.

Keywords: smectite; illite; mixed-layer minerals; kaolinite; chlorite; quartz; micas; feldspars.

ВВЕДЕНИЕ

Ранее были выявлены специфические черты минералогического строения комплекса почв (Варламов и др., 2023), представляющего генетический ряд солоды и лугово-осолоделой почвы лимана, находящегося на территории Джаныбекского стационара Института лесоведения РАН. В этой работе подробно описана минералогия солоды в центре лимана и лугово-осолоделой почвы на его периферийной части. Этой работой не были охвачены солоды, находящиеся в микрозападинах в днище лимана.

Несмотря на длительную историю исследования (Роде и др., 1961, 1964; Корнблум и др., 1972, 1976; Талызина, 1994; Зайдельман, 1998; Алексеев, 1999; Алексеева и др., 2010) западного макрорельефа и микрорельефа Северного Прикаспия, вопросы его происхождения, развития этих форм, а также изменчивость рельефа в пределах контуров лиманов до настоящего времени является дискуссионным вопросом. Микрозападины в днищах лиманов издавна обращали на себя внимание специалистов разных направлений. Они осложняют рельеф днища лимана, имея округлую форму диаметром 5–8 м и глубину 15–25 см. К настоящему времени существуют более двух десятков гипотез их генезиса. В результате анализа имеющихся по данному вопросу публикаций (Гедройц, 1926; Большаков и др., 1937; Мозесон, 1955; Сидоренко и др., 1978; Молодых, 1980; Абатуров, 2010) установлено несколько

причин формирования микрозападин в днищах лиманов: неровности дна отступивших морских вод, действие ветра с формированием котлов выдувания, более низкие значения замерзания почвенного раствора, просадочные деформации грунтовых оснований вследствие современной суффозии в лёссах, древние карстовые явления суффозионного и эрозионного происхождения. Полигенетичность древних западин связывают также с отмиранием гидро-сети при региональном перераспределении талых и дождевых вод по поверхности и их застаивании на относительно плоских поверхностях. Представление о криогенной природе мелкозападинного рельефа содержится в публикациях Величко и др. (1978), где отмечается термокарстовая природа микроподов европейской части России. Результаты исследований почв замкнутых блюдцеобразных понижений в лиманах отражены в работах Сидоренко и др. (1978), Молодых (1980), Варламова и др., (2023). Таким образом, микрозападины в днище лиманов как природные явления обладают комплексом специфических природно-геологических особенностей, знание которых представляет в научном и прикладном значении особый интерес при освоении территорий. Перспективы орошения этих почв определяют актуальность исследования территорий с западинным микрорельефом. Значение для сельского хозяйства обуславливается специфическим набором свойств этих территорий, с которыми связано наличие мозаичного распределения избыточно-переувлажненных почв и пород, а также явления вымокания и вымерзания культур. При хозяйственном освоении данных территорий имеются сложности за счет разнотипных почвенно-грунтовых условий. Нивелирование микрорельефа требует дополнительных мелиоративных мероприятий особенно в почвенных контурах с микропонижениями. При этом нет ясного понимания тенденций развития западинного рельефа. Согласно исследованиям (Хитров, 2005), полученные результаты по изучению изменения микрорельефа солонцовых комплексов Джаныбекского стационара Института лесоведения РАН за полвека свидетельствуют о разнонаправленных трендах их развития во времени. Очевидно, что образование западинных форм микрорельефа обуславливает периодическое переувлажнение почв. При этом усложняется структура почвенного покрова и снижается агроно-

мическая ценность земель. Масштабы этого процесса не только снижают сельскохозяйственную ценность земель, но и затрудняют их использование, а также в целом ухудшают экологическую обстановку этой территории.

Цель исследования: 1) изучение особенностей профильного распределения минералов солоди лугово-степной среднемошной в центре микрозападины, сформированной в днище лимана и сопряженной с ней солодью лугово-степной глубокой на ее бровке; 2) реконструкция физико-минералогических условий формирования и развития микрозападины.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Изученный лиман (рис. 1А) площадью около 3 га находится на опытном участке в 1.5 км от усадьбы Джаныбекского стационара Института лесоведения РАН между 1-ой и 2-ой лентами Государственной лесополосы. Микрорельеф лимана хорошо выражен и представлен небольшими в диаметре (до 6–7 м) западинами с относительным понижением до 30 см. Размещение их по днищу лимана (рис. 2) характеризуется слабовыраженным “сотовидным” характером. В лимане площадь, занятая микрозападинами, составляет около 3–5% от его общей площади, они сосредоточены преимущественно в центральной части днища. По нашим наблюдениям, периодически при весеннем снеготаянии вода в микрозападинах держится в течение нескольких недель.

Изучено два почвенных разреза. Первый разрез (ЕВ-1-23) вскрывает солодь лугово-степную среднемошную в центре наиболее глубокой микрозападины, расположенной в центральной части днища лимана. Растительность, описанная в мае 2024 г., представлена следующими видами: болотница болотная (*Eleocharis palustris* (L.) Roem. & Schult.), жерушник лесной (*Rorippa sylvestris* (L.) Besser), горец земноводный (*Persicaria amphibia* (L.) Delarbre), мятлик луковичный (*Poa bulbosa* L.), полынь сантонинная (*Artemisia santonicum* L.), мышехвостник маленький (*Myosurus minimus* L.), фунария влагомерная (*Funaria hygrometrica* Hedw.). Общее проективное покрытие – 28%. Вскипание с 15 см слабое, сильное с глубины > 40 см. На поверхности почвы в микрозападине фиксируются полигональные трещины шириной 0.5–1 см до

глубины 30–40 см. Формула профиля **EL-ELq-BT1q-BT2q-BSAnc-Csa,cs**. Название почвы: солодь лугово-степная среднеспособная легкоглинистая на хвалынских тяжелых суглинках (Классификация, 1977); солодь квазиглееватая сегрегационно-карбонатная среднеспособная глубоко гипсодержащая легкоглинистая на хвалынских тяжелых суглинках (Классификация, 2004); Luvic Columnic Albic Planosol (Loamic) (WRB-2015).



A



B



C

Рис. 1. **A** – общий вид микрозападин, заполненных водой, съемка 04.2024; **B** – профиль солоди среднеспособной раз. EB-1-22 (центр); WRB-2015: Luvic Columnic Albic Planosol (Loamic); **C** – профиль солоди раз. EB-2-23 (периферийная часть); WRB-2015: Luvic Columnic Albic Planosol (Loamic).

Fig. 1. **A** – general view of microdepressions filled with water, surveyed 04.2024; **B** – profile of medium-thickness malt deposit EB-1-22 (center); WRB-2015: Luvic Columnic Albic Planosol (Loamic); **C** – profile of malt deposit EB-2-23 (peripheral part); WRB-2015 Luvic Columnic Albic Planosol (Loamic).

Второй разрез (ЕВ-2-23) заложен на бортовой части этой блюдцеобразной западины с выходом на ровную часть днища лимана, в 4 м от первого разреза (рис. 1С). В отличие от первого разреза трещины на поверхности здесь отсутствуют. Растительность представлена следующими видами: Овсяница валлисская (*Festuca valesiaca* Gaudin), Осока узколистая (*Carex stenophylla* Wahlenb.), Лапчатка серебристая (*Potentilla argentea* L.), Девясил британский (*Inula britannica* L.), Мятлик луковичный (*Poa bulbosa* L.), Полынь сантонинная (*Artemisia santonicum* L.), Мышехвостник маленький (*Myosurus minimus* L.), Гусиный лук низкий (*Gagea pusilla* (F.W. Schmidt) Sweet), Птицемлечник Фишера (*Ornithogalum fischerianum* Krasch.), Кермек Гмелина (*Limonium gmelinii* (Willd.) Kuntze). Общее проективное покрытие – 96%. Слабое вскипание с 66 см, сильное > 75 см. Формула профиля **{EL+ELrz}-ELq-BT1q-BT2-BCAnc-Cca,cs**. Название почвы: солодь лугово-степная глыбокая тяжелосуглинистая-глинистая на хвалынских тяжелых суглинках (Классификация, 1977); солодь квазиглееватая сегрегационно-карбонатная глубоко гипсодержащая тяжелосуглинисто-глинистая на хвалынских тяжелых суглинках (Классификация, 2004) ; Luvic Columnic Albic Planosol (Loamic) (WRB-2015).

Солоди сформировались на однородных тяжелых карбонатных хвалынских отложениях до глубины одного метра. Расположение разрезов в рельефе на участке лимана представлено на рисунке 2. Дополнительно была проведена диаметральная нивелирная съемка профиля микрозападины с шагом в 10 см и с отображением данных двухгодичных наблюдений по одним реперным точкам (рис. 3.).

Морфологические отличия между двумя почвами состоят в том, что фрагментарные кутаны на агрегатах фиксируются на морфологическом уровне только в солоди разр. ЕВ-1-23, развитой в микрозападине, а в солоди на бровке западины кутаны фиксируются только на микроуровне. Оба разреза в нижней части осолоделого горизонта имеют Fe-Mn конкреции диаметром до 3 мм. При этом в разр. ЕВ-1-23 они имеют рыхлое строение, а в солоди разр. ЕВ-2-23 фиксируются плотные Fe-Mn конкреции. Карбонаты в разр. ЕВ-1-23 фиксируются с 20 см, достигая максимума содержания (более 24%) на глубине 70 см; а в разр. ЕВ-2-23 – с 60 см с

максимальным содержанием 20% на глубине 120 см. Профиль со-
лоди в микрозападине отличается преобладанием буроватых от-
тенков.

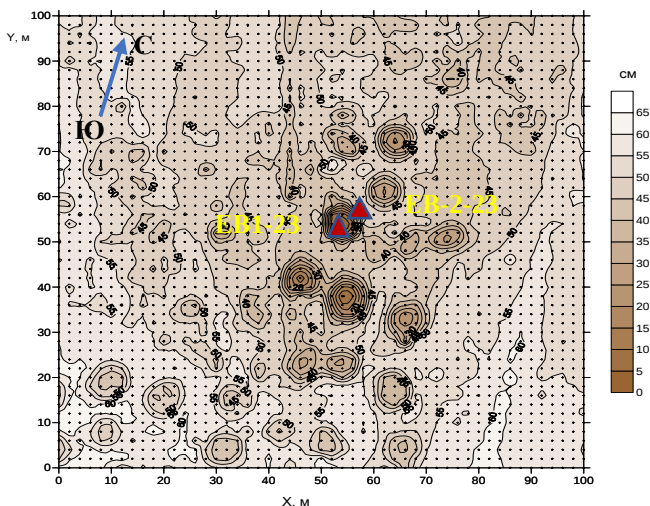


Рис. 2. Микрорельеф участка центральной части дна лимана с микрозападинами. Высота относительная, см. Сечение через 5 см. Съемка 2022 г. Составил Варламов Е.Б., Колесников А.В.

Fig. 2. Microrelief of the central part of the estuary bottom with microdepressions. Relative height, cm. Section every 5 cm. Survey 2022. Compiled by Varlamov E.B., Kolesnikov A.V.

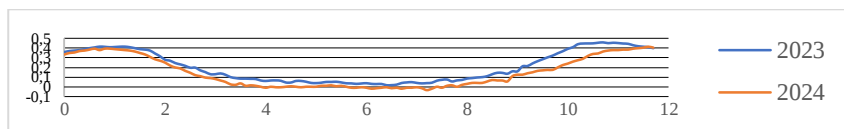


Рис. 3. Топографический профиль через микрозападину в днище лимана с шагом 10 см. Высота относительная, см. Съемка 2023 и 2024 гг. Составил Варламов Е.Б., Чурилин Н.А. при участии Колесникова А.В.

Fig. 3. Topographic profile through a microdepression in the bottom of the estuary with a step of 10 cm. Relative height, cm. Survey 2023 and 2024. Compiled by Varlamov E.B., Churilin N.A. with the participation of Kolesnikov A.V.

Методы исследований. Выделение гранулометрических фракций (<1, 1–5, 5–10 и >10 мкм) проводили исчерпывающим отмучиванием по методике Горбунова (1971), количественное содержание каждой фракции использовали при перерасчете минерального состава на почву в целом. Карбонаты, гипс, легкорастворимые соли перед фракционированием удаляли. С целью стандартизации перед определением минералогического состава глинистые фракции были насыщены Mg^{2+} (из раствора 1М $MgCl_2$) и затем промыты до полного удаления избытка хлоридов. Исследование проведено с использованием рентгеновского дифрактометра фирмы Rigaku SmartLab. Ориентированные препараты получены путем седиментации фракций на покровные стекла размером 20 × 20 мм. Режим съемки образцов: излучение $Cu K\alpha$, напряжение на трубке 40 кВ, сила тока 50 мА, скорость сканирования 2°/мин, в угловом диапазоне от 2 до 34° 2 θ . Съемку глинистых и кластогенных минералов всех фракций с целью снижения влияния возможной неоднородности распределения препарата осуществляли с вращением образца по плоскости съемки со скоростью 30 об./мин. Дополнительно, для диагностики особенности лабильных минералов смектитовой фазы, образцы глинистых минералов фракции <1 мкм сняты после сольватации этиленгликолем и после прокаливании при 550 °С в течение 2 ч. Диагностика минералов проведена по следующим методическим разработкам (Рентгеновские методы и структура глинистых минералов, 1965), (Соколова и др., 2005) с привлечением базы данных JCPDS. Итоговые расчеты полуколичественного содержания минералов производили с применением программного обеспечения Дифрактометр-Авто, версия 2014, разработчик ООО “Ирис”. Соотношения базальных (пиковых) интенсивностей – по Biscaye (1964,1965). Отдельные образцы, отобранные по границе контакта осолоделого, текстурного и аккумулятивно-карбонатных горизонтов, исследовали на сканирующем электронном микроскопе FEG-SEM KYKY-EM8000 в режиме HV (High Vacuum) и при ускоряющем напряжении 20 кВ. Образцы после монтажа на столики напыляли золотом (Au) в течение 90 сек. при помощи универсальной напылительной установки GVC-5000 (Китай).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Сравниваемые сообщества растительности в центре и у края микрозападины различаются по видовому составу, что свидетельствует о различиях в условиях их произрастания (рис. 1А).

Оба разреза имеют глинистый гранулометрический состав. Содержание физической глины (частиц <10 мкм) в бескарбонатных горизонтах ЕL и ВТ более 50%, в карбонатных горизонтах нижних частей профилей содержание силикатных частиц размером <10 мкм составляет 45–49%, что рассчитывалось после удаления карбонатов. Если учесть, что почвенные карбонаты обычно имеют размерность, соответствующую тонкой и средней пыли, то можно заключить, что и нижние горизонты также имеют глинистый гранулометрический состав.

Распределение гранулометрических фракций по профилям солодей представлено в таблице 1. В обоих разрезах распределение ила имеет элювиально-иллювиальный характер с минимумом в поверхностных горизонтах ЕL и максимумом в верхних частях текстурных горизонтов (ВТ1). В солоди, заложенной в центре микрозападины (разр. ЕВ-1-23) в гор. ЕL, отмечается более высокое содержание ила (31–34%) по сравнению с разрезом на бровке микрозападины (22–23%). Глубже (в ВТ и ВСА) содержание ила в обоих разрезах приблизительно одинаковое. Отметим, что контрастность по содержанию ила между верхней элювиальной и средней иллювиальной частями профиля выражена намного резче в солоди на бровке микрозападины. Вариабельность в содержании частиц <1 мкм в генетически различных горизонтах, очевидно, связана с контрастностью условий почвообразования по профилю. В результате этого наиболее тонкие и более подвижные минеральные частички вымываются из верхних частей профилей и переносятся в срединные горизонты, где происходит их относительное накопление. Судя по профильному распределению ила, относительное его накопление происходит и в гор. ВТ1q,i солоди микрозападины и в гор. ВТ1q в солоди на ее бровке (табл. 1).

Таблица 1. Содержание гранулометрических фракций, выделенных методом Горбунова, %

Table 1. Content of granulometric fractions, isolated by Gorbunov's method, %

Гори- зонт	Глу- бина, см	% фракций				Потеря от HCl
		<1 мкм	1–5 мкм	5–10 мкм	>10	
Солодь лугово-степная среднемогучная тяжелосуглинистая на хвалын- ских тяжелых суглинках разр. EB-1-23						
EL	0–8	30.9	13.0	9.3	46.8	0.0
ELq	10–17	34.4	11.5	8.4	45.8	0.0
BT1q,i	21–30	43.9	8.3	6.3	41.6	4.7
BT2q,i	44–58	38.6	5.7	5.9	49.8	17.7
BCAnc,m с	64–70	37.5	3.9	5.1	53.6	24.6
BCAnc	90–100	34.3	6.1	4.9	54.7	20.2
Cca,cs	>120	36.8	3.3	4.8	55.2	20.0
Солодь лугово-степная глубокая тяжелосуглинистая на хвалынских тяжелых суглинках разр. EB-2-23						
EL+ELrz	0–10	21.8	11.1	10.8	56.3	0.0
ELq	10–26	23.3	6.6	10.8	59.2	0.0
BT1q	26–50	46.5	6.6	5.3	41.5	2.9
BT2	50–70	44.8	6.7	6.0	42.5	3.1
BCAnc,m с	70– 89(92)	41.5	2.7	5.4	50.4	13.9
BCAnc	89(92)– 130	29.2	10.6	8.1	52.1	18.4

Распределение тонкой (1–5 мкм) и средней (5–10 мкм) пыли, наоборот, имеет строго аккумулятивный характер с максимумом в поверхностных горизонтах и с постепенным уменьшением до се-

редины горизонта ВТ, и с одинаковым их содержанием в более глубоких горизонтах.

В профилях выделяются горизонты ВСАпс с более высоким содержанием в них тонко- и среднепылеватых фракций на разной глубине – 64–100 см в разр. ЕВ-1-23 и 70–130 см в разр. ЕВ-2-23 (табл. 1). Таким образом, установлено повышенное содержание илистых частиц в солоди разр. ЕВ-1-23 по сравнению с разрезом ЕВ2-23.

Что касается солоди микрозападины, то подобная дифференциация профиля с фрагментарными глинистыми кутанами на гранях структурных отдельностей на глубине залегания иллювиального горизонта свидетельствует, по-видимому, о наличии в почвенном растворе катионов, обуславливающих высокую степень диспергации почвенной массы. Возможность активной диспергации почвенной массы подтверждается результатами анализа грунтовых вод и водной вытяжки (табл. 2, 3).

Таблица 2. Уровень, состав и минерализация грунтовых вод под почвами, ммоль(экв)/л
Table 2. Level, composition and mineralization of groundwater under soils, mmol(eq)/l

Разрез	УГВ, м	Минерализация, г/л	ммоль(экв)/л							
			CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺
ЕВ-1-23	3.75	0.527	0.60	4.80	0.40	1.50	3.00	2.50	1.76	0.04
ЕВ-2-23	4.37	0.323	0.20	3.00	0.20	1.00	2.50	1.00	0.74	0.16

Уровень грунтовых вод весной 2024 г. под разр. ЕВ-1-23 и разр. ЕВ-2-23 составлял 3.75 и 4.37 м соответственно. Минерализация воды в микрозападине имеет почти в два раза выше концентрацию, чем на бровке. Химический состав грунтовых вод также

существенно различается, несмотря на малое расстояние между скважинами. В разр. ЕВ-1-23 химизм грунтовых вод сульфатно-натриевый, в разр. ЕВ-2-23 – сульфатно-кальциевый. Основное различие связано с высоким содержанием катионов Na^+ (1.76 и 0.74 ммоль(экв)/л) и Mg^{2+} (2.50 и 1.00 ммоль(экв)/л) и сульфат аниона SO_4^{2-} (1.5 и 1.00 ммоль(экв)/л) при общей минерализации грунтовых вод 0.527 и 0.323 г/л в разрезах ЕВ-1-23 и ЕВ-2-23 соответственно.

Водородный показатель рН водной вытяжки у почвы микрозападины имеет слабо щелочную реакцию в отличие от кислой реакции солоди на бровке. Химический состав водной вытяжки показывает принципиальное различие солевых профилей почв, которое заключается в следующем: солодь разр. ЕВ-1-23 имеет в профиле два максимума – один на глубине 20 см (рис. 4А), другой в нижней части горизонта ВТ; солодь разр. ЕВ-2-23 имеет только один максимум в нижней части горизонта ВТ. Такой характер распределения солей задается исключительно промывным режимом в почве на бровке в отличие от солоди микрозападины, где происходит сезонная смена водного режима с промывного на выпотной. Химический состав растворов в обоих разрезах солодей одинаковый – преобладают из анионов сульфаты и хлориды, из катионов магний и натрий. Но количественно их содержание различно – большее их содержание отмечено в солоди микрозападины, что связано с особенностями химизма и минерализацией грунтовых вод. В нижних частях профилей (глубина 80 см) обе солоди близки по химическому составу (рис. 4).

Содержание обменных катионов Na^+ , Mg^{2+} хорошо согласуется (табл. 3.) с условиями периодического выщелачивания солей во время избыточного увлажнения и фиксации катионов в ППК. Значения емкости катионного обмена имеют относительно невысокие величины, что связано с небольшим компенсированным зарядом минералов ППК. При этом установлен ряд особенностей, который свидетельствует о продвинутой стадии формирования качественного состава ППК. Фиксируется более узкое соотношение катионов $\text{Ca}^+ : \text{Mg}^{2+}$ в солоди микрозападины относительно солоди на бровке, что и определяет повышение щелочности.

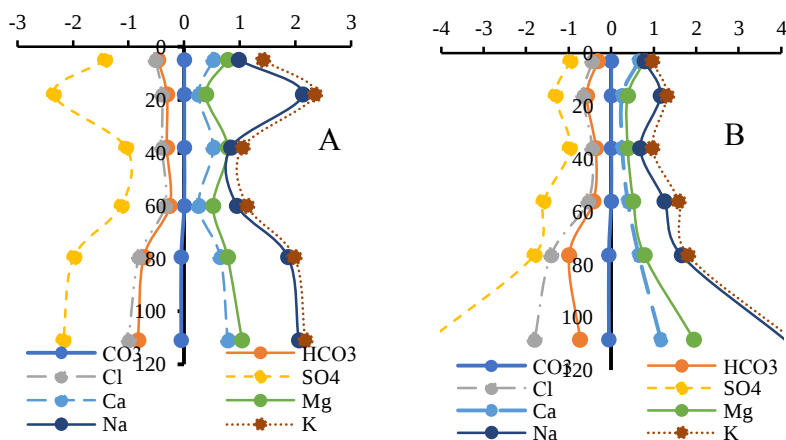


Рис. 4. Состав водной вытяжки 1 : 5. **А** – разр. EB-1-23; **В** – разр. EB-2-23, смоль(экв)/кг.

Fig. 4. Composition of water extract 1 : 5. **A** – EB-1-23; **B** – EB-2-23, cmol(eq)/kg.

Как ранее было установлено, в этом лимане (Талызина и др., 2014; Варламов и др., 2023) минералогический состав глинистых и кластогенных минералов почвообразующих пород обеих солодей одинаково поликомпонентный. В илистой фракции почвенных горизонтов преобладают иллиты, смешаннослойные иллит-сметтиты в сопровождении каолинита и небольшого количества хлорита (табл. 4.). Различия между почвами проявляются в более высоком содержании СМ-фазы в иле поверхностных горизонтов солоди разр. EB-1-23. Вниз по профилям обеих солодей уменьшается содержание иллита и возрастает количество смешаннослойного иллит-сметтита. На фоне высокого содержания иллита обращает на себя внимание увеличение в верхней части горизонта ВТ содержания СМ-фазы (в перерасчете на почву в целом) в почве разр. EB-1-23 (табл. 4.). Состав кластогенных минералов в сравниваемых почвах однотипен. Контрастность профильного распределения кварца, плагиоклазов, хлорита в профилях солодей показывает, что их устойчивость зависит от рН среды. На щелочной фон

больше реагирует кварц и хлориты, нежели чем КПШ и слюды (Корнблум и др., 1972, 1976). Меньшее содержание (рис. 5, 6) в поверхностных горизонтах разр. ЕВ-1-23 таких минералов как хлорит, кварц, полевые шпаты, вероятно, может свидетельствовать о более интенсивном их выветривании в гидроморфных и щелочных условиях этого профиля, если исключить литологическую неоднородность почвообразующих пород.

Схема профильного распределения глинистых минералов обеих солодей элювиально-иллювиальная. При этом солодь микрозападины (раз. ЕВ-1-23, рис. 7, 8) имеет два максимума по содержанию СМ-фазы и каолинита в профиле, а солодь на бровке только один – в средней части текстурного горизонта (70 см). Предполагаем, что указанные различия в характере распределения минералов сравниваемых почв связаны с более длительными гидроморфными условиями микрозападины. Косвенно об этом также свидетельствуют, по-видимому, подвижные гидрооксиды железа, придающие выраженный буроватый тон профилю солоди в разр. ЕВ-1-23. В целом можно отметить, что минералогический состав осолоделых горизонтов сравниваемых разрезов практически не различается, за исключением их мощности.

В обоих профилях в элювиальной толще преобладающим компонентом илистой фракции являются ди-триоктаэдрические иллиты, на долю которых приходится более 50% при расчете на фракцию. Содержание этого компонента с глубиной уменьшается и минимум (29–34%) его содержания фиксируется в переходных к породе горизонтах обеих почв. Максимальное содержание смешанослойных иллит-сметитов (46–49%) отмечается в нижних горизонтах солодей (начиная с 40 см). Указанные минералы сопровождаются каолинитом и магнезиально-железистым хлоритом. В обеих солодях фиксируются следы тонкодисперсной размерности кварца и полевых шпатов.

В связи с контрастностью увлажнения и более высокой минерализацией почвенных растворов минералогические изменения в солоди микрозападины выражены более ярко. Деградационные изменения затронули СМ-фазу, иллит, хлорит и каолинит.

Таблица 3. Состав обменных катионов, смоль(+)/кг
Table 3. Composition of exchangeable cations, cmol/kg

Генетический горизонт	Глубина отбора, см	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	ЕКО эфф.	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺
		смоль(+)/кг					% от ЕКО			
Разрез EB-1-23										
EL+ELrz	0-8	12.50	2.5	0.01	2.51	17.52	71.3	14.3	0.1	14.3
ELq	10-17	10.0	6.25	0.02	2.22	18.49	54.1	33.8	0.1	12.0
BT1q,i	21-30	16.25	3.75	0	2.19	22.19	73.2	16.9	0	9.9
BT2q,i	44-58	13.75	7.5	0.59	1.83	23.68	58.1	31.7	2.5	7.7
BCAnc,mc	64-70	15.0	6.25	0.11	2.36	23.72	63.2	26.3	0.5	10.0
BCAnc	90-100	17.5	2.5	0	1.5	21.51	81.4	11.6	0	7.0
Разрез EB-2-23										
EL+ELrz	0-10	6.25	3.75	0.11	2.85	12.96	48.2	28.9	0.8	22
ELq	10-26	8.75	2.5	0.08	2.7	14.03	62.3	17.8	0.6	19.3
BT1q	26-50	8.75	3.75	0.08	2.61	15.19	57.6	24.7	0.5	17.2
BT2	50-70	16.25	3.75	0	2.19	22.19	73.2	16.9	0	9.9
BCAnc,mc	70-92	17.5	2.5	0	1.5	21.51	81.4	11.6	0	7.0

Таблица 4. Соотношение основных минералов фракции <1 мкм из образцов почв, раз. ЕВ-1-23, ЕВ-2-23, %
Table 4. The ratio of the main minerals of the <1 μm fraction from soil samples, %

Генетический горизонт	Глубина, см	Содержание фракции <1 мкм, %	$\frac{I_{1.0}}{I_{0.5}}$	Фракция <1 мкм				Почва в целом, %			
				СМ	И	Х	Кл	СМ	И	Х	Кл
Разрез, ЕВ-1-23											
EL+ELrz	0-8	30.9	5.2	31	54	3	12	9.6	16.7	0.9	3.7
ELq	10-17	34.4	5.0	31	55	3	11	10.6	18.8	1.1	3.9
BT1q,i	21-30	43.9	4.4	36	48	3	13	15.9	20.9	1.3	5.8
BT2q,i	44-58	38.6	3.8	40	39	5	15	15.6	15.2	2.0	5.8
BCAnc,mc	64-70	37.5	3.2	47	34	6	12	17.8	12.8	2.4	4.6
BCAnc	90-100	34.3	2.8	49	29	6	15	16.7	10.1	2.2	5.3
Cca,cs	>120	29.2	3.0	47	33	7	14	13.6	9.6	2.0	4.0

Продолжение таблицы 4
Table 4 continued

Генетический горизонт	Глубина, см	Содержание фракции <1 мкм, %	$\frac{I_{1.0}}{I_{0.5}}$	Фракция <1 мкм				Почва в целом, %			
				СМ	И	Х	Кл	СМ	И	Х	Кл
Разрез, ЕВ-2-23											
EL+ELrz	0-10	21.8	5.0	26	56	3	15	5.7	12.1	0.6	3.4
ELq	10-26	23.3	4.0	29	54	5	12	6.8	12.7	1.0	2.8
BT1q	26-50	46.5	4.2	34	50	4	11	15.8	23.4	2.1	5.3
BT2	50-70	44.8	4.1	40	46	4	11	17.7	20.5	1.8	4.7
BCAnc,mc	70-89(92)	41.5	4.0	42	40	5	13	17.4	16.7	2.0	5.3
BCAnc	89(92)-130	36.8	2.9	46	34	7	12	17.1	12.3	2.4	5,0

Примечание. СМ – смешанослойные минералы; И – иллит; Х – хлорит; Кл – каолинит; $I_{1.0\text{HM}}/I_{0.5\text{HM}}$ – соотношение интенсивности рефлексов первого и второго порядка для иллита.

Note. СМ – mixed-layer minerals; И – illite; Х – chlorite; К – kaolinite; $I_{1.0\text{HM}}/I_{0.5\text{HM}}$ – ratio of intensity of first and second order reflexes for illite.

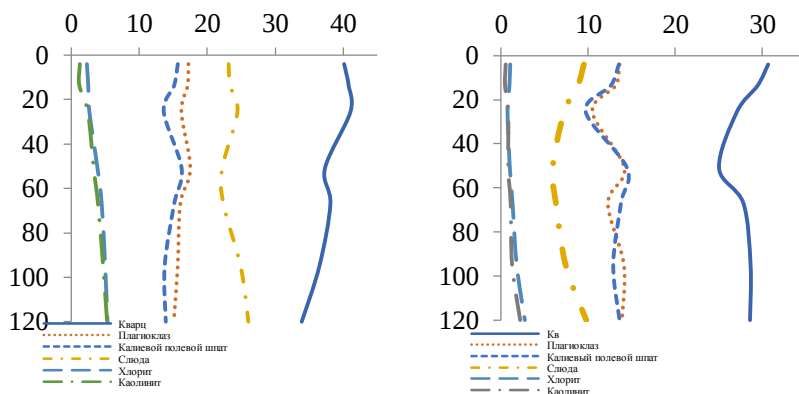


Рис. 5. Содержание минералов фракции >1 мкм в профиле почвы разр. EB1-23. **A** – расчет на фракцию, **B** – расчет на почву в целом, %.

Fig. 5. The content of minerals in the fraction >1 μm in the soil profile of section p. EV1-23. **A** – calculated for fraction, **B** – calculated for the soil as a whole, %.

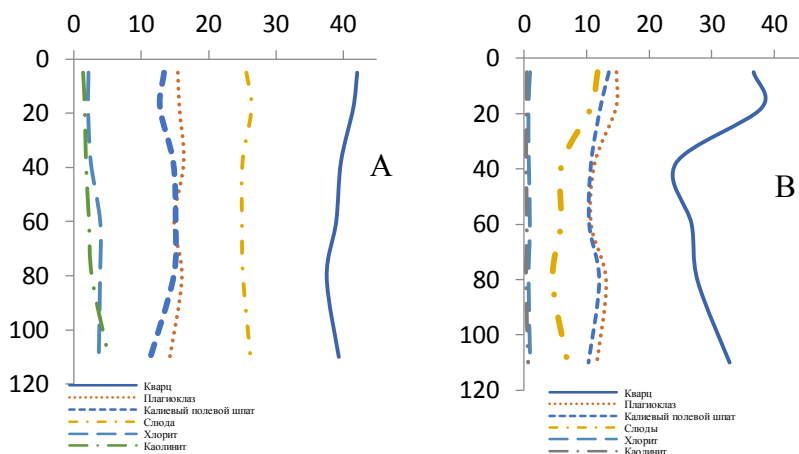


Рис. 6. Содержание минералов фракции >1 мкм в профиле почвы разр. EB2-23. **A** – расчет на фракцию, **B** – расчет на почву в целом, %.

Fig. 6. The content of minerals in the fraction >1 μm in the soil profile of section p. EV-2-23. **A** – calculated for fraction, **B** – calculated for the soil as a whole, %.

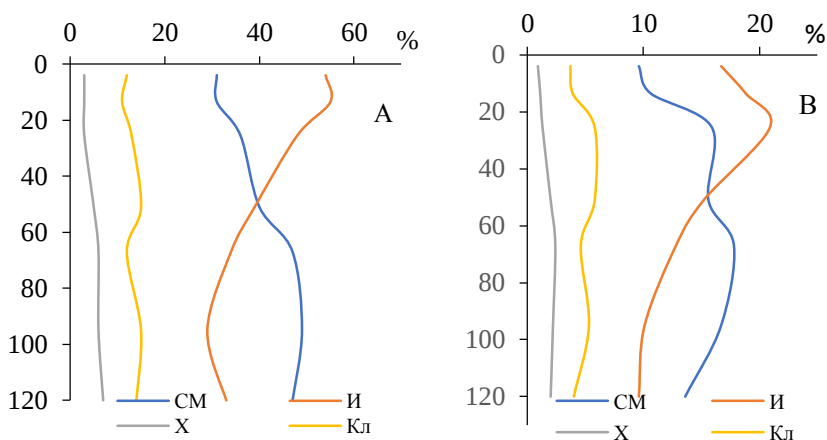


Рис. 7. Распределение минералов фракции <1 мкм в профиле разр.ЕВ-1-23. **А** – расчет на фракцию; **В** – расчет на почву в целом, %.

Fig. 7. Distribution of minerals of fraction <1 μm in the profile of EB-1-23. **A** – calculation for fractions; **B** – calculation for the soil as a whole, %.

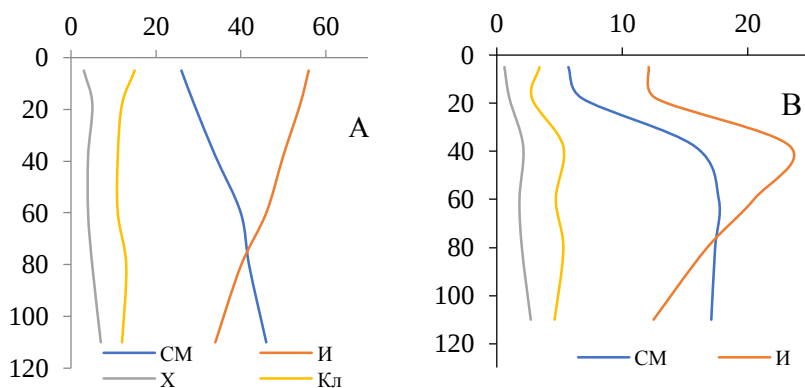


Рис. 8. Распределение минералов фракции <1 мкм в профиле разр.ЕВ-2-23. **А** – расчет на фракцию; **В** – расчет на почву в целом, %.

Fig. 8. Distribution of minerals of fraction <1 μm in the profile of EB-2-23. **A** – calculation for fractions; **B** – calculation for the soil as a whole, %.

В профилях на рентгенографических кривых это проявляется в виде резкого спада или, наоборот, увеличения интенсивности (рис. 9, 10) 14 и 10-ангстремовых рефлексов. В разр. ЕВ-1-23 микрозападины фиксируется резкий спад 10Å рефлекса в глубь профиля и возрастание 14Å. На сольватированных этиленгликолем препаратах это проявляется в виде тренда возрастания с глубиной интенсивности 17-18 Å рефлекса с асимметрией в область малых углов (СМ-фаза и смешаннослойные иллит-сметиты). Увеличение СМ-фазы можно объяснить (Кринари и др., 2014) обратной трансформацией иллита в сметтит. В раз. ЕВ-1-23 это дает основание сделать вывод об увеличении вклада разбухающих слоев в общую дифракционную картину рассматриваемой ассоциации минералов. В течение этого процесса (Соколова и др., 2005), по видимому, блоки слюд изменяются по сторонам базальных поверхностей, особенно со стороны торцевых сколов, с развитием в этих частях их смешаннослойности. Фоновое изменение рН среды сопровождается увеличением степени замещения Si на Al в тетраэдрических позициях структуры лабильной СМ-фазы (Градусов, 1976). Дополнительное поступление катиона K^+ определяет его адсорбцию межслоевыми промежутками разбухающих минералов. В результате этого количество лабильных слоев к поверхности снижается и преобладающими становятся неразбухающие минералы.

Анализ снимков (рис. 11) электронной микроскопии показал, что в зоне перехода осолоделого горизонта к текстурному наблюдаются определенные различия между почвами. Локально отличия в разрезах сосредоточены в нижней части ЕЛ на границе с ВТ. Наибольшие различия между разрезами выявлены по мощности и составу кутан на агрегатах и на поверхности отдельных крупных минералов.

В условиях глинисто-лессовидного покрова Северного Прикаспия на площадях с локальным базисом эрозии и перераспределения осадков отмечается стадийность в формировании микрозападин в лиманах (рис. 12). По нашему мнению, процессы изменения тяжелосуглинистых сметтитсодержащих пород, которые происходят в результате незамкнутых циклов взаимодействия глина–вода, являются начальной стадией поверхностного диагенеза.

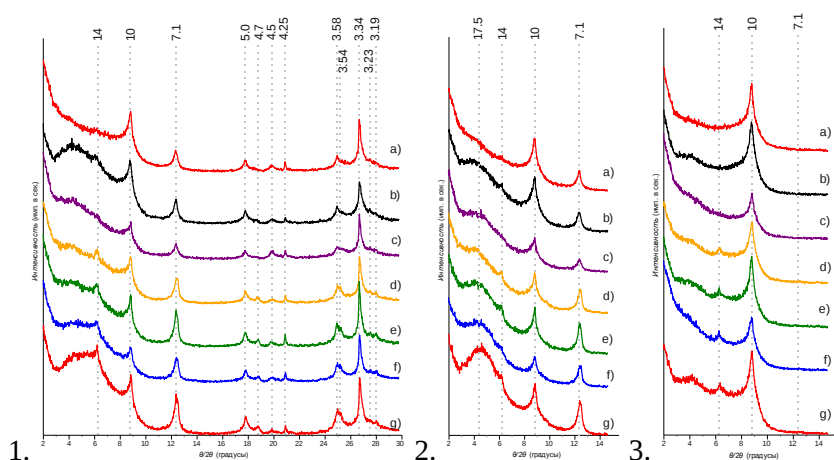


Рис. 9. Рентгендифрактограммы фракции менее 1 мкм в почве днища микрозападины (разр. EB-1-23): а) гор. EL+ELrz 0–8 см; б) гор. ELq 10–17 см; в) гор. BT1q 21–30(44) см; д) гор. B2 30(44)–58 см; е) гор. BCAnc,mc 64–70 см; ф) гор. BCAnc 90–100 см; г) гор. Cca,cs >120 см. Межплоскостные расстояния в ангстремах (Å); 1 – воздушно-сухое состояние образца; 2 – после сольватации этиленгликолем; 3 – после прокаливании при 550 °С в течение 2 ч.

Fig. 9. X-ray diffraction patterns of fractions less than 1 μm. Section EV-1-23: а) EL+ELrz 0–8 cm; б) ELq 10–17 cm; в) BT1q 21–30(44) cm; д) B2 30(44)–58 cm; е) BCAnc,mc 64–70 cm; ф) BCAnc 90–100 cm; г) Cca,cs >120 cm. Interplanar distances in angstroms (Å); 1 – air-dry state of the sample; 2 – after solvation with ethylene glycol; 3 – after calcination at 550 °C for 2 h.

При этом образование микрозападин связано с трансформацией минералов, формированием трещин в текстурных горизонтах, содержащих повышенное содержание лабильных минералов, и дальнейшим уплотнением срединных горизонтов за счет засыпки рыхлого элювиального материала осолоделого горизонта в поверхностные трещины. Дополнительным фактором в образовании микрозападин, вероятно, является и повышенная теплоемкость обводненной западины, сохраняющая дневное тепло более дли-

тельное время. Латеральная миграция солевых водных растворов в микрозападины с последующей их внутрипрофильной фильтрацией также способствует уплотнению верхней части текстурного горизонта при высыхании. Исследования (Курганова, 1986) фиксировали преобладание микрозападин в этом же лимане глубиной 20 см. Сравнение данных глубин микрозападин (Курганова, 1986) с нашими наблюдениями 2023–2025 гг. (рис. 3.) показали тенденцию к просадке их днища к настоящему времени до 30 см.

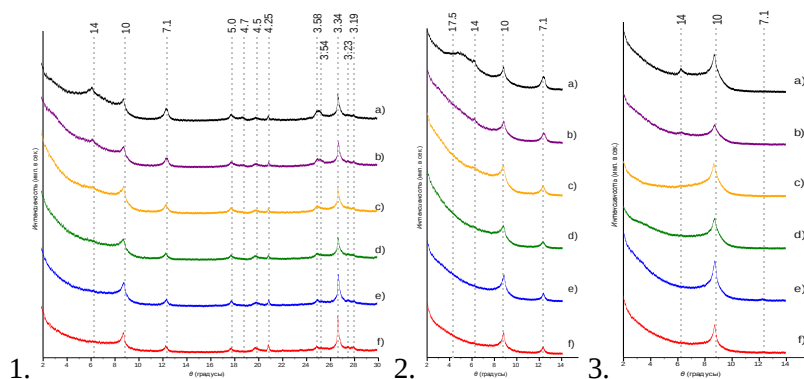


Рис. 10. Рентгendifрактограммы фракции менее 1 мкм. Разр. EV-2-23: а) гор. EL+ELrz 0–10 см; б) гор. ELq 10–26 см; в) гор. BT1q 26–50 см; д) гор. B2 50–70 см; е) гор. BCAnc,mc 70–89(92) см; ф) гор. BCAnc 89(92)–130 см. Межплоскостные расстояния в ангстремах (Å); 1 – воздушно-сухое состояние образца; 2 – после сольватации этиленгликолем; 3 – после прокаливании при 550 °C в течение 2 ч.

Fig. 10. X-ray diffraction patterns of the fraction less than 1 μm , section EV-2-23: а) EL+ELrz 0–10 cm; б) ELq 10–26 cm; в) BT1q 26–50 cm; д) B2 50–70 cm; е) BCAnc,mc 70–89(92) cm; ф) BCAnc 89(92)–130 cm. Interplanar distances in angstroms (Å); 1 – air-dry state of sample; 2 – after solvation with ethylene glycol; 3 – after calcination at 550 °C for 2 h.

ЕВ1-23, 10–17 см, нижняя часть	ЕВ2-23, 10–26 см, нижняя часть
Деградация тонкого глинистого покрытия на плоскости зерна кварца.	Сплошное обволакивание кутанами отдельных агрегатов и минералов.
Полностью отмытая от кутан поверхность кварца со следами химического выветривания.	Осколки зерна кварца с признаками физического дробления с образованием трещин.
ЕВ-1-23, 21–30 см	ЕВ-2-23, 26–50 см
Фрагментарное покрытие кутаной. Глинисто-коллоидный комплекс обнажается на углах минералов.	Слоистые органо-глинистые кутаны на поверхности минерала.
ЕВ1-23, 44–58 см, нижняя часть.	ЕВ-2-23, 70–89(92) см
Однотипное строение мелкокристаллических карбонатов.	

Рис. 11. Изображения поверхности агрегатов в разрезах ЕВ-1-24 и ЕВ-2-24, полученные с помощью SEM.

Fig. 11. Images of the surface of aggregates in soil profiles EB-1-24 and EB-2-24 obtained using SEM.

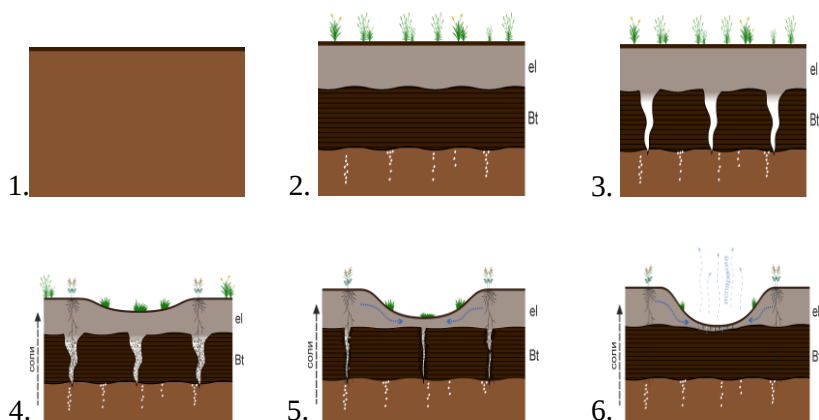


Рис. 12. Стадии формирования микрозападин.

Fig. 12. Stages of microdepression formation.

Таким образом, изменение глубины просадки микрозападины происходит при сочетании нескольких определяющих факторов: а) вымывание коллоидных и водно-растворимых продуктов химических реакций в глубь профиля, при котором уменьшается объем почвенно-грунтовой толщи приводящее к усилению просадки микрозападины; б) разрушение кластогенных минералов и железистых конкреций. Согласно имеющимся представлениям (Черняховский, 1991), образование группы OH^- приводит к ионизации кремния и алюминия, что облегчает возможность их атаки со стороны OH^- ионов. К подобному же результату приводит и концентрация иона водорода, присутствие в растворах органических кислот, длительная гидроморфная экспозиция микрозападины при повышенной температуре и присутствие CO_2 . Рыхлый по свойствам осолоделый горизонт способствует перераспределению избытка воды в микропонижениях, в результате повышенная влажность поддерживается более длительное время. Одинаковый калибр диаметров микрозападин лимана задается мощностью осолоделого горизонта, а занимаемая ими площадь зависит от интенсивности увлажнения поверхностными водами. По мере расшире-

ния площади микрозападин в лимане происходит более равномерное распределение поверхностных вод, а стадии локального гидроморфизма становятся короче, что ведет к затуханию их образования. На исследованном лимане в настоящее время обеспечивается образование только локальных микропонижений.

ВЫВОДЫ

1. В лиманах Северного Прикаспия формируются блюдца – микрозападины диаметром до 8 м и глубиной до 30–35 см, в которых развиваются своеобразного строения и состава почвы – среднемошные солоды, существенно отличающиеся от мощных фоновых солодов днища лимана.
2. Солоды микрозападины содержит в 1.5 раза больше иллита, СМ-фазы, смешаннослойных иллит-сметитов и в 1.5 раза меньше кварца, полевых шпатов, хлоритов.
3. Увеличение доли илистых частиц, большая контрастность гранулометрического состава почвенных профилей в микрозападинах, предположительно, связаны с интенсивным разрушением минерального субстрата *in situ* на контакте осолоделого горизонта с текстурным и с партлювацией частиц в трещины.
4. Формирование специфического микрорельефа лиманов – вторичный процесс, связанный с локальными особенностями гидрологического режима, изменением плотности текстурных горизонтов, с интенсификацией химического выветривания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абатуров Б.Д. Западинный рельеф Прикаспийской низменности и механизмы его формирования // Аридные экосистемы. 2010. Т. 16. № 5(45). С. 151–159.
2. Алексеев В.Е. Минералогия почвообразования в степной и лесостепной зонах Молдовы. Диагностика, параметры, факторы, процессы. Кишинев, 1999. 214 с.
3. Алексеева Т.В., Алексеев А.О., Демкин В.Д., Алексеева В.А., Соколовская З., Хайнс М., Калинин П.И. Физико-химические и минералогические признаки солонцового процесса в почвах нижнего Поволжья в позднем голоцене // Почвоведение. 2010. № 10. С. 1171–1189.

4. *Большаков А.Ф., Боровский В.М.* Почвы и микрорельеф Прикаспийской низменности // Солонцы Заволжья. Мат-лы изысканий, исследований и проектирования ирригации Заволжья. М.–Л.: Изд-во ВАСХНИЛ, 1937. Вып. VII. С. 134–169.
5. *Варламов Е.Б., Лебедева М.П., Чурилин Н.А., Мусаэлян Р.Э., Колесников А.В.* Особенности минералогического состава солоди и осолоделой лугово-каштановой почвы на примере лиманных западин Джаныбекского стационара Института лесоведения РАН // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2023. Вып. 117. С. 140–176. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2023-117-140-176>.
6. *Гедройц К.К.* Осолодение почв. Вып. 44. М., 1926. 48 с.
7. *Горбунов Н.И.* Методика подготовки почв к минералогическим анализам // Методы минералогического и микроморфологического изучения почв. М.: Наука, 1971. С. 5–15.
8. *Зайдельман Ф.Р.* Процесс глееобразования и его роль в формировании почв. М., 1998. 316 с.
9. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
10. Классификация и диагностика почв СССР. М.: Колос. 1977. 224 с.
11. *Корнблум Э.А., Дементьева Т.Г., Зырин Н.Г., Бирин А.Т.* Изменение глинистых минералов при образовании южного и слитого черноземов, лиманной солоди и солонца // Почвоведение. 1972. № 1. С. 67–85.
12. *Корнблум Э.А., Дементьева Т.Г.* Химико-минералогические особенности лиманных солодей пустынно-степного Заволжья // Почвоведение. 1976. №8. С. 107–121.
13. *Курганова И.Н.* Лиманные солоды как компонент почвенного покрова в условиях полупустыни (на примере Джаныбекского стационара АН СССР): Дисс. ...к. б. н. М., 1986. 147 с.
14. *Кринари Г.А., Храмченков М.Г., Рахматулина Ю.Ш.* Изменение структур смешанослойных фаз иллит-сметтит в процессах обводнения терригенных коллекторов нефти // Геология и геофизика. 2014. Т. 55. № 7. С. 1153–1167.
15. *Мозесон Д.Л.* Микрорельеф северо-западной части Прикаспийской низменности и его влияние на поверхностный сток // Тр. Ин-та леса АН СССР. 1955. Т. 25. С. 55–65.
16. *Молодых И.И.* Инженерно-геологические особенности микрорельефа перигляционной зоны Украины. Киев: О-во “Знание”, 1980а. 26 с.
17. Рентгеновские методы изучения и структура глинистых минералов / Под ред. Брауна Г. М.: Мир, 1965. 599 с.
18. *Роде А.А., Польский М.Н.* Почвы Джаныбекского стационара, их морфологическое строение, механический и химический состав

физические свойства // Тр. Почв. Ин-та им. В.В. Докучаева. Т. 59. М., 1961. С. 3–214.

19. Роде А.А., Ярилова Е.А. Рашевская И.М. Генетические особенности профиля лиманной солоди // В кн.: Новое в теории оподзоливания и осолодения почв. М., 1964. С. 62–96.

20. Сиренко Н.А., Молодых И.И. Пространственная изменчивость лессов Украины // Физ. География и геоморфология. 1978. Вып. 20. С. 97–105.

21. Соколова Т.А., Дронова Т.Я., Толпешта И.И. Глинистые минералы в почвах. Тула, 2005. 336 с.

22. Талызина И.В., Соколова Т.А., Кулакова Н.Ю., Сапанов М.К. Химико-минералогическая характеристика и некоторые параметры калийного состояния черноземовидной почвы и лиманной солоди // Почвоведение. 1994. № 9. С. 61–67.

23. Хитров Н.Б. Связь почв солонцового комплекса Северного Прикаспия с микрорельефом // Почвоведение. 2005. № 3. С. 237–249.

24. Хитров Н.Б. Генезис вертисолов с микрорельефом гильгай (обзор) // Почвоведение. 2016. № 5. С. 531–541.

25. Черняховский А.Г. Современные коры выветривания. М.: Наука, 1991. 207 с.

26. Чижикова Н.П., Евтифеев Ю.Г., Панкова Е.И. Минералогический состав илистых фракций пустынных почв Монголии // Почвоведение. 1988. № 8. С. 44–54.

27. Biscaye P.E. Mineralogy and sedimentation of the deep-sea sediment fine fraction in the Atlantic Ocean // *Geochem. Techn. Rept.* 1964. Vol. 49. No. 9/10. P. 1281–1289.

28. Biscaye R.E. Mineralogy and sedimentation of recent deep-sea clay in the Atlantic Ocean and adjacent Seas and Oceans // *Geological Soc. Am. Bull.* 1965. Vol. 76. No. 7. P. 803–832.

29. Cook H.E., Johnson P.D., Matti J.C., Zemmels I. Methods of sample preparation and X-ray diffraction data analysis, X-ray Mineralogy Laboratory, Deep Sea Drilling Project, University of California, Riverside // In: *Init. Repts.* Washington: U.S. Govt. Printing Office, 1975. P. 999–1007.

REFERENCES

1. Abaturov B.D., Zapadinnyj rel'ef Prikaspijskoj nizmennosti i mehanizmy ego formirovaniya (The depression relief of the Caspian lowland and the mechanisms of its formation), *Aridnye ekosistemy*, 2010, Vol. 16, No. 5(45), pp. 151–159.

2. Alekseev V.E., *Mineralogija pochvoobrazovaniya v stepnoj i lesostepnoj zonah Moldovy. Diagnostika, parametry, faktory, processy* (Mineralogy of soil

formation in the steppe and forest-steppe zones of Moldova. Diagnostics, parameters, factors, processes), Kishinev, 1999, 241 p.

3. Alekseeva T.V., Alekseev A.O., Demkin V.D., Alekseeva V.A., Sokolovska Z., Hajns M., Kalinin P.I., Fiziko-himicheskie i mineralogicheskie priznaki soloncovogo processa v pochvah nizhnego Povolzh'ja v pozdnem golocene (Physicochemical and mineralogical features of the solonetz process in the soils of the lower Volga region in the late Holocene), *Pochvovedenie*, 2010, No. 10, pp. 1171–1189.

4. Bolshakov A.F., Borovsky V.M., Pochvy i mikrorel'ef Prikaspijskoj nizmennosti (Soils and microrelief of the Caspian Lowland), In: *Soloncy Zavolzh'ja* (Proc. Solonetztes of the Trans-Volga Region), Moscow–Leningrad: Izd-vo VASHNIL, 1937, Iss. VII, pp. 134–169.

5. Varlamov E.B., Lebedeva M.P., Churilin N.A., Musaelyan R.E., Kolesnikov A.V., Features of the mineralogical composition of solod and solod meadow-chestnut soil, the case of soils of the liman depression at Dzhanybek research station of the Institute of Forest Science RAS, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2023, Vol. 117, pp. 140–176, DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2023-117-140-176>.

6. Gedroits K.K., *Osolodenie pochv* (Soil solodization), Iss. 44, Moscow, 1926, 48 p.

7. Gorbunov N.I., Metodika podgotovki pochv k mineralogicheskim analizam (Methods of soil preparation for mineralogical analysis), In: *Metody mineralogicheskogo i mikromorfologicheskogo izuchenija pochv* (Methods of mineralogical and micromorphological study of soils), Moscow: Nauka, 1971, pp. 5–15.

8. Zaidelman F.R., Process gleeobrazovaniya i ego rol' v formirovanii pochv (Gley formation process and its role in soil formation), Moscow, 1998, 316 p.

9. *Klassifikacija i diagnostika pochv Rossii* (Classification and Diagnostics of Soils of Russia), Smolensk: Ojkumena, 2004, 342 p.

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

11. Kornblum E.A., Dementyeva T.G., Zyrin N.G., Birina A.T., Izmenenie glinistyh mineralov pri obrazovanii juzhnogo i slitogo chernozemov, limannoj solodi i solonca (Changes in clay minerals during the formation of southern and fused chernozems, estuary solod and solonetz) *Pochvovedenie*, 1972, No. 1, pp. 67–85.

12. Kornblum E.A., Dementyeva T.G., Himiko-mineralogicheskie osobennosti limannyh solodej pustynno-stepnogo Zavozh'ja (Chemical and mineralogical features of estuary solods of the desert-steppe Zavozhye), *Pochvovedenie*, 1976, No. 8, pp. 107–121.

13. Kurganova I.N., *Limannye solodi kak komponent pochvennogo pokrova v*

usloviyah polupystyni (na primere Dzhanybetskogo stacionara AN SSSR): Diss. ... k. b. n. (Liman maltings as a component of soil cover in semi-desert conditions (on the example of Dzhanybeksy stationary of the USSR Academy of Sciences), Candidate of Biological Sciences thesis), Moscow, 1986, 147 p.

14. Krinari G.A., Khranchenkov M.G., Rakhmatulina Yu.Sh., *Izmenenie struktur smeshanoslojnyh faz illit-smektit v processah obvodneniya terrigen-nyh kollektorov nefiti* (Changes in the structures of mixed-layer illite-smectite phases in the processes of flooding of terrigenous oil reservoirs), *Geologija i geofizika*, 2014, Vol. 55, No. 7, pp. 1153–1167.

15. Mozeson D.L., *Mikrorel'ef severo-zapadnoj chasti Prikaspijskoj nizmennosti i ego vlijanie na poverhnostnyj stok* (Microrelief of the northwestern part of the Caspian lowland and its influence on surface runoff), *Proc. Forest Institute AN SSSR*, 1955, Vol. 25, pp. 55–65.

16. Molodykh I.I., *Inzhenerno-geologicheskie osobennosti mikrorel'efa periglacionnoj zony Ukrainy* (Engineering-geological features of the microrelief of the periglacial zone of Ukraine), Kiev: Izd-vo "Znanie", 1980a, 26p.

17. Braun G. (Ed.), *Rentgenovskie metody izuchenija i struktura glinistyh mineralov* (X-ray methods for studying and the structure of clay minerals), Moscow: Mir, 1965, 599 p.

18. Rode A.A., Pol'skiy M.N., *Pochvy Dzhanybetskogo stacionara, ih morfologicheskoe stroenie, mehanicheskij i himicheskij sostav fizicheskie svojstva* (Soils of the Dzhanybek station, their morphological structure, mechanical and chemical composition, physical properties), *Proc. V.V. Dokuchaev Soil Science Institute*, Vol. 59, Moscow, 1961, pp. 3–214.

19. Rode A.A., Yarilova E.A., Rashevskaya I.M., *Geneticheskie osobennosti profilja limannoj solodi* (Genetic features of the estuary solod profile), In: *Novoe v teorii opodzolivanija i osolodenija pochv* (New in the theory of podzolization and solodization of soils), Moscow, 1964, pp. 62–96.

20. Sirenko N.A., Molodykh I.I., *Prostranstvennaja izmenchivost' lessov Ukrainy* (Spatial variability of loesses of Ukraine), *Fiz. Geografija i geomorfologija*, 1978, Iss. 20, pp. 97–105.

21. Sokolova T.A., Dronova T.Ya., Tolpeshta I.I., *Glinistye mineraly v pochvah* (Clay minerals in soils), Tula, 2005, 336 p.

22. Talyzina I.V., Sokolova T.A., Kulakova N.Yu., Sapanov M.K., *Khimikominalogicheskaja kharakteristika i nekotorye parametry kalijnogo sostojanija chernozemovidnoj pochvy i limannoj solodi* (Chemical and mineralogical characteristics and some parameters of potassium state of chernozem-like soil and liman malt), *Pochvovedenie*, 1994, No. 9, pp. 61–67.

23. Khitrov N.B., *Svjaz' pochv soloncovogo kompleksa Severnogo Prikaspija s mikrorel'efom* (Relationship between soils of the solonetz complex of the

Northern Caspian region and microrelief), *Pochvovedenie*, 2005, No. 3, pp. 237–249.

24. Khitrov N.B., Genezis vertisolej s mikrorel'efom gil'gaj (obzor) (Genesis of Vertisols with Gilgai Microrelief (Review)), *Pochvovedenie*, 2016, No. 5, pp. 531–541.

25. Chernyakhovsky A.G., *Sovremennye kory vyvetrivanija* (Modern Weathering Crusts), Moscow: Nauka, 1991, 207 p.

26. Chizhikova N.P., Evtifeev Yu.G., Pankova E.I., Mineralogicheskij sostav ilistyh frakcij pustynnyh pochv Mongolii (Mineralogical composition of clay fractions of desert soils of Mongolia), *Pochvovedenie*, 1988, No. 8, pp. 44–54.

27. Biscaye P.E., Mineralogy and sedimentation of the deep-sea sediment fine fraction in the Atlantic Ocean, *Geochem. Techn. Rept.*, 1964, Vol. 49, No. 9/10, pp. 1281–1289.

28. Biscaye R.E., Mineralogy and sedimentation of recent deep-sea clay in the Atlantic Ocean and adjacent Seas and Oceans, *Geological Soc. Am. Bull.*, 1965, Vol. 76, No. 7, pp. 803–832.

29. Cook H.E., Johnson P.D., Matti J.C., Zemmels I., Methods of sample preparation and X-ray diffraction data analysis, X-ray Mineralogy Laboratory, Deep Sea Drilling Project, University of California, Riverside, In: Init. Repts. Washington: U.S. Govt. Printing Office, 1975, pp. 999–1007.

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2025-123-273-299



Cite this article as:

Kannazarova Z., Juliev M., Muratov A., Astanakulov K., Shavazov K., Bibliometric analysis of publications about soil salinity in Central Asia during 2000–2022 with a special look at the importance of drainage, Dokuchaev Soil Bulletin, 2025, V. 123, pp. 273-299, DOI: 10.19047/0136-1694-2025-123-273-299

Ссылки для цитирования:

Канназарова З., Джулиев М., Муратов А., Астанакулов К., Шавазов К. Библиометрический анализ публикаций о засолении почв в Центральной Азии за 2000–2022 гг. с акцентом на дренаж // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2025. Вып. 123. С. 273-299. DOI: 10.19047/0136-1694-2025-123-273-299

Acknowledgments:

The authors express their appreciation to the project USAID Central Asia's Regional Water and Vulnerable Environment Activity for technical support in the framework of the Young Scientists Competition.

Bibliometric analysis of publications about soil salinity in Central Asia during 2000–2022 with a special look at the importance of drainage

© 2025 Z. Kannazarova^{1*}, M. Juliev^{1,2,3**}, A. Muratov^{1***},
K. Astanakulov^{1****}, K. Shavazov^{1*****}

¹*Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural Mechanization Engineers,
National research University,
39 Kori Niyazi street, Tashkent, 100000, Uzbekistan,*

^{}<https://orcid.org/0000-0003-0690-7925>,*

e-mail: kannazarovazulfiya@tiiame.uz,

*^{**}<https://orcid.org/0000-0002-8582-0352>,*

e-mail: mukhiddinjuliev@gmail.com,

*^{***}e-mail: ashirbek55@mail.ru,*

*^{****}e-mail: k.astanakulov@tiiame.uz,*

*^{*****}e-mail: k.shavazov@tiiame.uz.*

²*Institute of Fundamental and Applied Research,
“TIAME” National Research University,
39A Kori Niyoziy, Tashkent 100000, Uzbekistan.*

³*Turin Polytechnic University in Tashkent,
Small Ring Road 17, Tashkent, 100000, Uzbekistan.*

Received 25.07.2024, Revised 01.08.2024, Accepted 21.05.2025

Abstract: Soil salinity is a serious disaster in many arid and agricultural regions, especially in Central Asia. The extensive economic impact of soil salinization on the national economy of Central Asian countries is significant. To solve the above problem, three systems are of great importance: drainage system, high-quality land leveling (planning) and salt washing activities. The aim of this study to review published articles on the issue of the term of soil salinity regions in Central Asia from 2000 to 2022. Aligning with this aim, we have collected, reviewed, and analyzed 661 publications, met the selection criteria in the Scopus database during 2000–2022. Bibliometric analysis showed that all articles were published in English, with the highest publication numbers coming from the Uzbekistan, Kazakhstan, Germany, China, the Russian Federation and the United States. The bibliometric analysis showed that international research on soil salinity and importance of drainage system is needed to expand the scientific exchange on this topic, as well as long-term, continuous research and sustainable development of soil salinization concepts for future agriculture and soil salinity management integration will be useful.

Keywords: salinization; Scopus; citations; research trend; review.

Библиометрический анализ публикаций о засолении почв в Центральной Азии за 2000–2022 гг. с акцентом на дренаж

Резюме: Засоление почв является серьезным бедствием во многих засушливых и сельскохозяйственных регионах, особенно в Центральной Азии. Экстенсивное экономическое воздействие засоления почв на национальную экономику стран Центральной Азии весьма значительно. Для решения этой проблемы большое значение имеют три системы: дренажная система, качественное выравнивание (планирование) земель и мероприятия по промывке почв от солей. Целью данного исследования является обзор опубликованных статей по вопросу сроков засоления почв в регионах Центральной Азии с 2000 по 2022 гг. В соответствии с этой целью авторами была собрана, рассмотрена и проанализирована 661 публикация, отвечающая критериям отбора, в базе данных Scopus за период 2000–2022 гг. Библиометрический анализ показал, что все статьи были опубликованы на английском языке, а наибольшее количество публикаций приходится на Узбекистан, Казахстан, Германию, Китай, Российскую Федерацию и США. Библиометрический анализ также

показал, что для расширения научного обмена по данной теме необходимы международные исследования по засолению почв и дренажу, а также были бы полезны долгосрочные, непрерывные исследования и концепции использования засоленных почв для устойчивого развития будущей сельскохозяйственной деятельности и управления засолением почв.

Ключевые слова: засоление; Scopus; цитирование; направление исследований; обзор.

INTRODUCTION

Soil salinity has become a problem affecting agricultural development worldwide (Charzyński et al., 2022). Approximately one billion hectares of irrigated land is saline (Syshchykov et al., 2024), making up about 25% of all the irrigated land, with about half suffering from secondary soil salinity to some degree (Ivushkin et al., 2019a). In recent years, soil salinity has become a global problem that affects cultivated areas both in terms of quality and health (Iovcheva, Semenov, 2023), severely impacting agriculture development and crop production (Elhaj et al., 2018; Salimzoda et al., 2021; Ghasemi et al., 2022). Large areas of land have been abandoned due to secondary salinization resulted from irrational farming practices that increase soil salinity (Usmanova, 2003; Egamberdieva et al., 2014; Aimbetov, Bekimbetov, 2021; Duan et al., 2022). It is hard to meet the needs of the planet on only 93 million hectares of land, despite the serious food crisis today (Bezborodov et al., 2010a). Salinity of the soil has long been a problem in Central Asia (Egamberdieva et al., 2010, 2014; Begmatov et al., 2020; Liu et al., 2022). It is already clear that regional climate change is likely to exacerbate droughts and summer heat, and the future precipitation regime is unknown (Karimov et al., 2014; Salimzoda et al., 2021; Laiskhanov et al., 2022; Ruziyev et al., 2022). Salinization of irrigated croplands causes significant damage to agriculture in the (semi-) arid regions of Central Asia (Shirokova, 2000; Salimzoda et al., 2021; Laiskhanov et al., 2022; Liu et al., 2022). In particular, a third of 2.3 million hectares in Kazakhstan, followed by more than a tenth of 1.1 million hectares in the Kyrgyz Republic, 16.1% of 720 thousand hectares in Tajikistan, 96% of 1.7 million hectares in Turkmenistan; one-third of the irrigated land in Uzbekistan — approximately half of

the total 4.3 million hectares — is highly vulnerable to soil salinization (Shirokova, 2000). The state of reclamation of irrigated lands in the countries of Central Asia, in particular, in Uzbekistan, Tajikistan and Turkmenistan, and soil salinity cannot be separated from the water table, its salinity and migration (Forkutsa et al., 2009; Ibrakhimov et al., 2011; Khasanov et al., 2022; Turdaliev et al., 2022). The level of ground water and its salinity largely depends on the technical conditions of the drainage network and the level of atmospheric precipitation, the supply of fresh water during the growing season, and the movement of ground water from the surrounding area (Abduraimova et al., 2021). The effects of topography (Romanovskaya, Savin, 2020), soil texture, and irrigation and drainage networks have been found to favor shallow groundwater enhanced by excessive water diversion (RSE Zonal hydrogeological-meliorative center of the Ministry of Agriculture of the Republic of Kazakhstan, 2019). Drainage networks, considered by many experts to be underdeveloped and in need of improvement to stop unacceptable groundwater levels, are being used below their maximum capacity (Khasanov et al., 2022). The solution to mitigating soil degradation is not only better drainage, but better controlled and flexible water management (Jalankuzov et al., 2013; Ravshanov et al., 2019). A bibliometric analysis may be a beneficial analytical device for obtaining information of studies patterns (etc., journals, authors, countries) and studies area characteristics (Zhang et al., 2010). Bibliometric analysis used various subject areas such as groundwater management (Kannazarova, et al., 2024), the English language (Mardieva et al., 2024), agriculture mechanization (Xaliqulov et al., 2023), grain stored (Mutalov et al., 2025), drainage in irrigated area (Kannazarova, et al., 2024). Bibliometric analysis of soil salinity was conducted in different research directions, e. g. soil erosion modelling (Bezak et al., 2021), soil remediation (Gao et al., 2022), climate change and natural resource scarcity (di Santo et al., 2022) and landslides (Khasanov et al., 2021). The purpose of this study is to analyze current topics and key regions in Central Asia in soil salinity research and to gain new insights into soil salinity research using historical metrological literature data.

MATERIALS AND METHODS

In this study bibliographic online Scopus database was used, concerning soil salinity and Central Asian countries for the period 2000–2022, including Kazakhstan, Kyrgyzstan, Tajikistan and Uzbekistan as the keywords. The analysis was conducted in October, 2022. A total of 661 Central Asia based publications were sorted out for the further analysis on soil solinity issue. The articles from the search were assessed and classified according to diverse aspects: number of papers per year, document type and list of the journals, and affiliation by country and institution. Article = (“soil salinity”), document type = “article”, timespan = “2000–2022” and deadline = October, 2022. The analysis was performed using CSV file, Microsoft Excel 2021, RIS, VOS viewer and [Map chart](#). Figure 1 shows the flow of the selected methodology for the research.

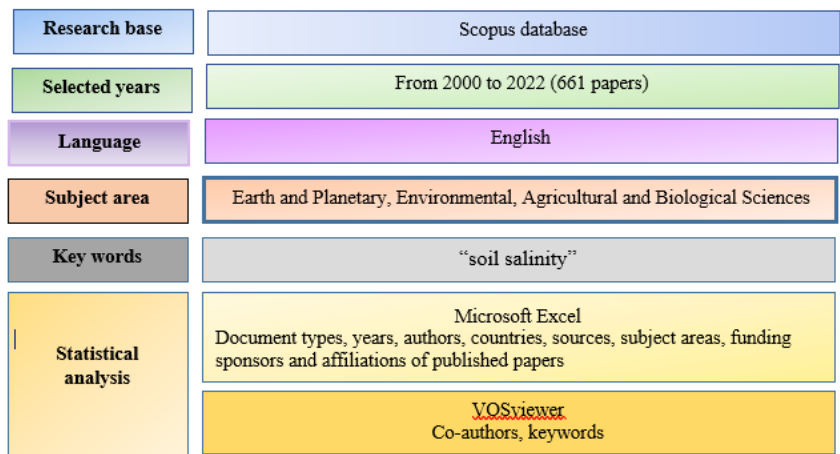


Fig. 1. Methodology flowchart.

Characteristics of soils in Central Asia

Soil type is the fundamental component of soil classification (light grey soils, typical grey soils, dark grey soils, brown, carbonate,

brown leached, etc.). Despite adhering to general classification principles, various objective and subjective factors contribute to differences in soil classification among republics. For instance, subjective differentiation of various types of soil: in Kyrgyzstan, the climate, plants, and landscape lead to the development of chestnut and mountain-chestnut soils, unique to the region and not found in other republics. In the grey soils zone, light and typical grey soils are sub-types that are identified. The most common confusion arises from diagnosing soil in high-altitude regions. Pedologists in Kyrgyzstan identify high-mountain, desert, steppe, and meadow-steppe soil as high mountain half-peat, while in Uzbekistan they are known as light-brown and meadow-steppe soils. The transitional soils consist of meadow takyric soils, along with remnant meadow and swampy soils located in the dried area of the Amu-Darya delta. Coastal solonchaks and sand are the main features at the dry bottom of the Aral Sea. Light, typical, and dark grey soils are predominant in the lower belt of piedmont subtropical semidesert. Mountainous regions with subhumid and humid climate conditions are home to cinnamonic and brown soils.

RESULTS AND DISCUSSION

Trend of publications on soil salinity in Central Asia

A total number of 661 articles were released from 2000 to 2022 focusing on the problem of soil salinity in Central Asia (Fig. 2). The number of records began increasing between 2000 and 2022, going from 1 to 145 publications. Figure 2 illustrates that a total of 95 articles were released from 2000 to 2012, but there was a significant rise from 31 to 145 articles between years 2013 and 2021. The peak of publications occurred in 2021 with a total of 145 articles published during the analysis period. Around 13.6% of all publications were released in the year 2022.

In addition, our research indicates that the majority of the papers analyzed, specifically 65% of 661, were research articles. This was followed by 131 conference proceedings, 49 book chapters, and 48 review papers. Other document types, such as Editorials and Books, made up only 0.4% (Fig. 3).

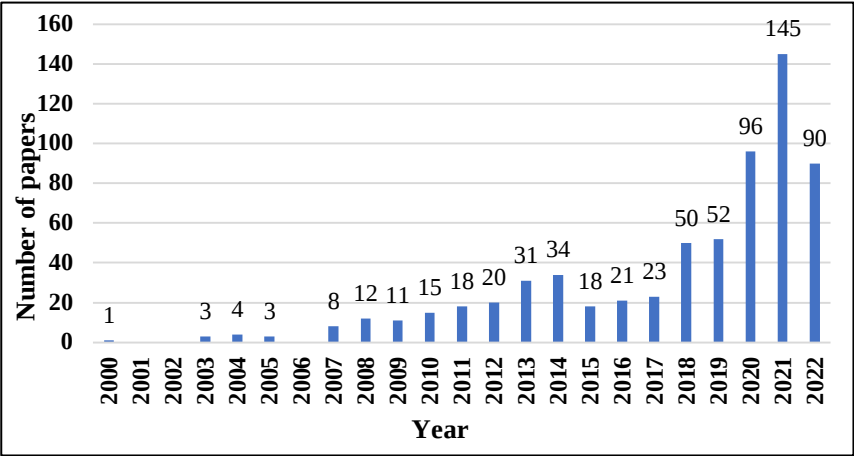


Fig. 2. Number of papers on soil salinity in Central Asia from 2000 to 2022.

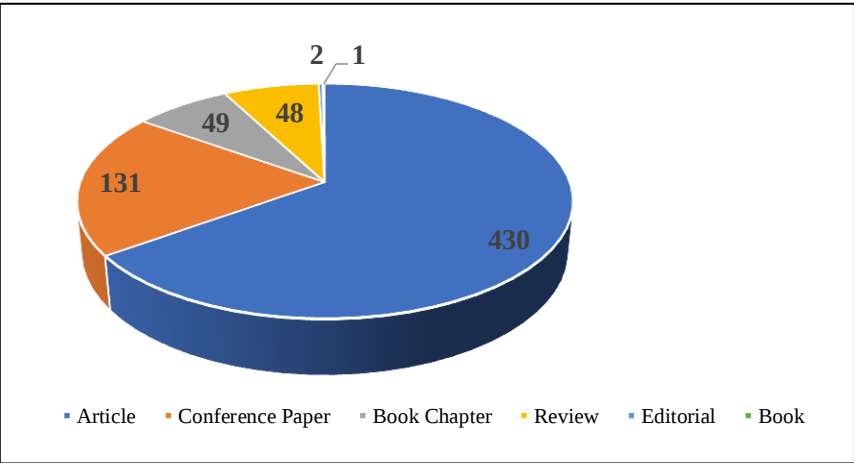


Fig. 3. Publication type on soil salinity in Central Asia.

Journals on soil salinity in Central Asia

The total output was divided among 141 journals from 90 countries according to the communication patterns of scholars. Out of the 15 journals, 212 papers (32%) were published in them while the remaining 68% of papers were published in different journals. Table 1 shows the names of the 42 journals that published at least 3 papers during the mentioned period.

Authors and their affiliated countries

A total of 860 authors from 90 different countries conducted research on soil salinity between the years 2000 and 2022, according to our findings. Figure 4 displays these ten authors who had produced over 12 papers. They are Egamberdieva, D. reigned with 46 publications, followed by Lamers, J.P.A. with 24, Martius, C. with 18, Wirth, S. with 16 papers, Jabborova, D. with 13, Shuyskaya, E.V., Abuduwaili, J., Khaitov, B., Toderich, K. and Toderich, K.N. each with 12 research papers. Between this list of top authors. Among the authors from the list there are three ones from Uzbekistan, three from Germany, two from Japan, one from Russia and one from Kazakhstan.

Over a span of two decades, 160 diverse organizations collaborated to release 661 documents on global soil salinity. Examining the publications on soil salinity from the top 10 institutes enabled us to identify the influential and productive institutions in this area. As shown in Figure 5, out of the 10 institutions, five were from Uzbekistan, two from China, two from Germany, and one from Kazakhstan. The Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural Mechanization Engineers National Research University holds the top spot with 95 records, followed by the National University of Uzbekistan named after Mirzo Ulugbek with 82 records, and Tashkent State Agrarian University with 60 records.

Top countries on soil salinity research

The five top producing countries in the field of soil salinity research between 2000 and 2022 are listed in Figure 6. Among them, Uzbekistan dominated with 414 publications, followed by Kazakhstan (222), Germany (125), China (78) and the Russian Federation (59).

Table 1. List of the journals on soil salinity in Central Asia

Scopus Source title	Number	Scopus Source title	Number
E3s Web of Conferences	53	Journal of Arid Environments	5
Iop Conference Series Earth and Environmental Science	36	Journal of Plant Nutrition	5
News of The National Academy of Sciences of The Republic of Kazakhstan Series of Geology and Technical Sciences	16	Saudi Journal of Biological Sciences	5
Water Switzerland	15	Advances in Colloid and Interface Science	4
Journal of Critical Reviews	14	Agriculture Switzerland	4
Agricultural Water Management	11	Communications in Soil Science and Plant Analysis	4
Agronomy	11	Polish Journal of Environmental Studies	3
Plants	11	Pollution Research	3
Iop Conference Series Materials Science and Engineering	8	Russian Journal of Ecology	3
Online Journal of Biological Sciences	7	Sustainability Switzerland	3
Frontiers in Plant Science	6	Field Crops Research	4
Irrigation and Drainage	6	Geoderma	4

Table 1 continued

Scopus Source title	Number	Scopus Source title	Number
Journal of Arid Land	6	Irrigation Science	4
Journal of Ecological Engineering	6	Journal of Agronomy and Crop Science	4
Land Degradation and Development	6	Journal of Hydrology	4
Plant Cell Biotechnology and Molecular Biology	6	Journal of Physics Conference Series	4
Acta Physiologiae Plantarum	5	Life Science Journal	4
Aip Conference Proceedings	5	Pakistan Journal of Botany	4
Arid Ecosystems	5	World Applied Sciences Journal	4
Bulgarian Journal of Agricultural Science	5	Biology and Fertility of Soils	3
Frontiers in Microbiology	5		
Irrigation and Drainage Systems	5		

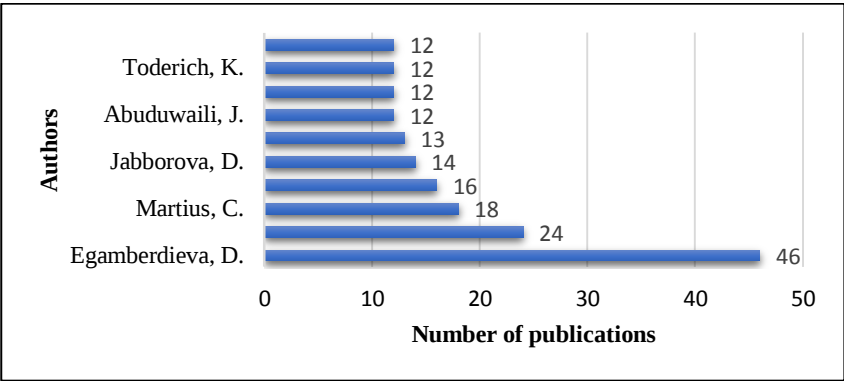


Fig. 4. Top authors on soil salinity in Central Asia.

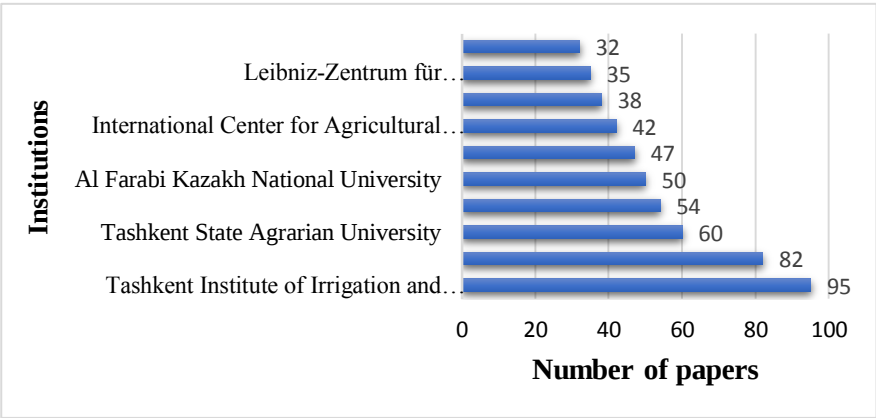


Fig. 5. Top of institutions on soil salinity.

Top cited papers on soil salinity in Central Asia

Ten mostly cited papers on soil salinity are shown in Table 2. (Ullrich et al., 2001; Egamberdieva et al., 2007, 2017, 2019; Egamberdieva, 2009; Egamberdieva, Kucharova, 2009; Bezborodov et al., 2010b; Ventura et al., 2011; Sommer et al., 2013; Ivushkin et al.,

2019b). Approximately 2 541 citations were awarded to the 10 papers listed in Table 2. The first 10 most cited papers include two reviews and eight research articles. In this compilation of the most referenced articles, Uzbekistan has six representations, UK, Israel, Germany and Netherlands have one representative each.

Top cited journals on soil salinity in Central Asia

We examined the leading journals in Figure 7 that released the most papers. Considering this factor, we chose to research the most frequently cited journals regarding soil salinity. At first, we organized the names of the sources in alphabetical order for 661 documents with excel file extension. Each journal's total paper citations are calculated gradually. Surprisingly, we obtained intriguing outcomes when updating the list of possible journal titles. Figure 7 displays 10 selected journals chosen initially.

Top co-authorships and keywords on soil salinity in Central Asia

The original file was brought into VOSviewer and used to generate a visualization of co-authorship and keyword co-occurrences (refer to Figures 8, 9) within the program. The examination of co-authorship produced a network consisting of 860 authors. Only authors having a minimum of three publications on the topic of soil salinity systems were included. There are 82 items distributed over 14 clusters: cluster 1 (12 items), cluster 2 (11 items), cluster 3 (11 items), cluster 4 (8 items), cluster 5 (6 items), cluster 6 (6 items), cluster 7 (6 items), cluster 8 (5 items), cluster 9 (4 items), cluster 10 (4 items), cluster 11 (3 items), cluster 12 (3 items), cluster 13 (2 items), cluster 14 (1 items).

Role of drainage in soil salinity studies

Drainage is important to prevent waterlogging, poor mechanical movements and salinity. As a result of this recognition, drainage technology and theory have become topics of importance in the fields of soil, water, and agriculture (van der Zee et al., 2017).

285

Table 2. Top cited publications on soil salinity in Central Asia

No.	Title	Journal	Corresponding author	PY	TC 2000-2022	Doc. type
1.	Mercury in the aquatic environment: A review of factors affecting methylation	Critical Reviews in Environmental Science and Technology	Ullrich S.M.	2001	1170	Review
2.	Alleviation of salt stress by plant growth regulators and IAA producing bacteria in wheat	Acta Physiologiae Plantarum	Egamberdieva D.	2009	233	Article
3.	High incidence of plant growth-stimulating bacteria associated with the rhizosphere of wheat grown on salinated soil in Uzbekistan	Environmental Microbiology	Egamberdieva D.	2008	202	Article
4.	Selection for root colonising bacteria stimulating wheat growth in saline soils	Biology and Fertility of Soils	Egamberdieva D.	2009	187	Article
5.	Salt-Tolerant Plant Growth Promoting Rhizobacteria for Enhancing Crop Productivity of Saline Soils	Frontiers in Microbiology	Egamberdieva D.	2019	131	Review

Table 2 continued

No.	Title	Journal	Corresponding author	PY	TC 2000-2022	Doc. type
6.	Effect of seawater concentration on the productivity and nutritional value of annual <i>Salicornia</i> and perennial <i>Sarcocornia</i> halophytes as leafy vegetable crops	Scientia Horticulturae	Ventura Y.	2011	129	Article
7.	Mulching and water quality effects on soil salinity and sodicity dynamics and cotton productivity in Central Asia	Agriculture, Ecosystems and Environment	Bezborodov G.A.	2010	127	Article
8.	Global mapping of soil salinity change	Remote Sensing of Environment	Ivushkin K.	2019	124	Article
9.	Endophytic bacteria improve plant growth, symbiotic performance of chickpea (<i>Cicer arietinum</i> L.) and induce suppression of root rot caused by <i>Fusarium solani</i> under salt stress	Frontiers in Microbiology	Egamberdieva D.	2017	121	Article
10.	Impact of climate change on wheat productivity in Central Asia	Agriculture, Ecosystems and Environment	Sommer R.	2013	117	Article

Note. * PY – Published year, * TC – Total citations.

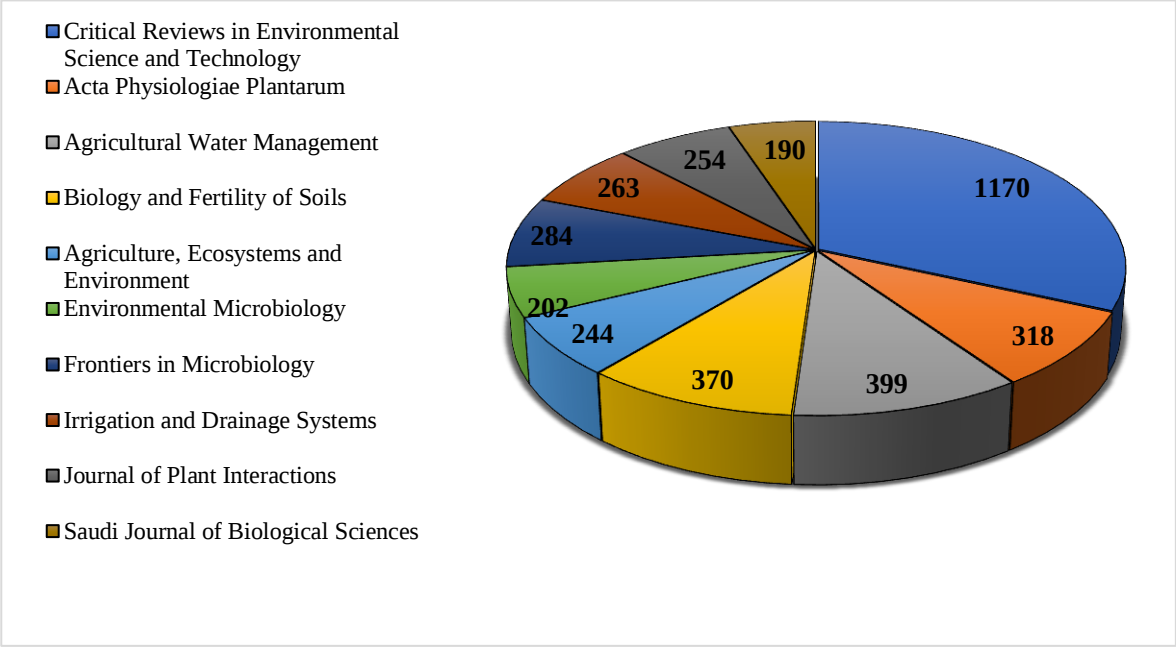


Fig. 7. Top cited journals on soil salinity in Central Asia.

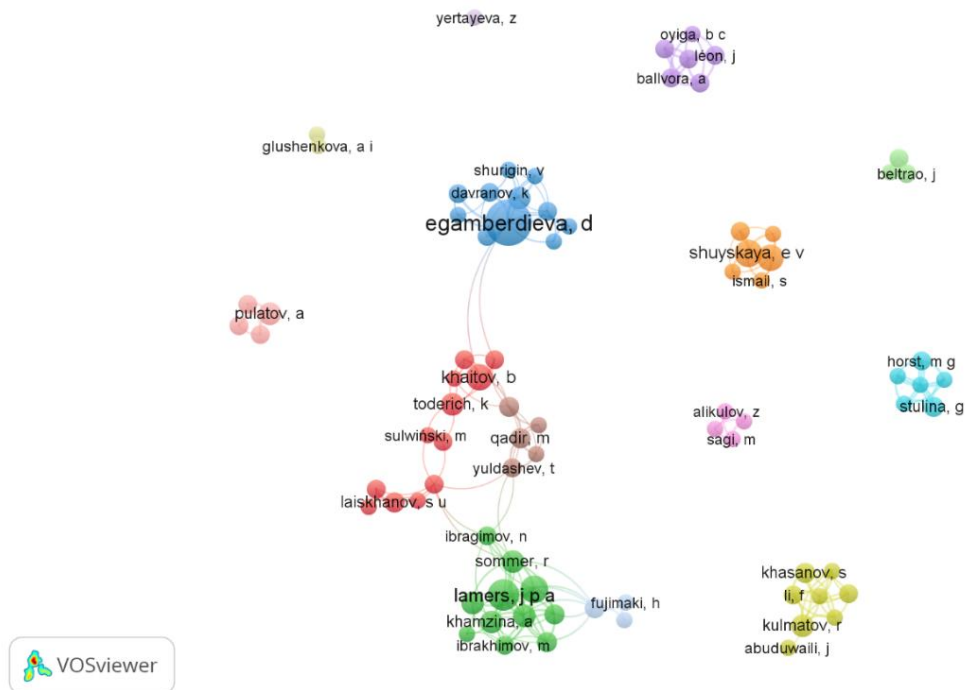


Fig. 8. Network map of top co-authorships.

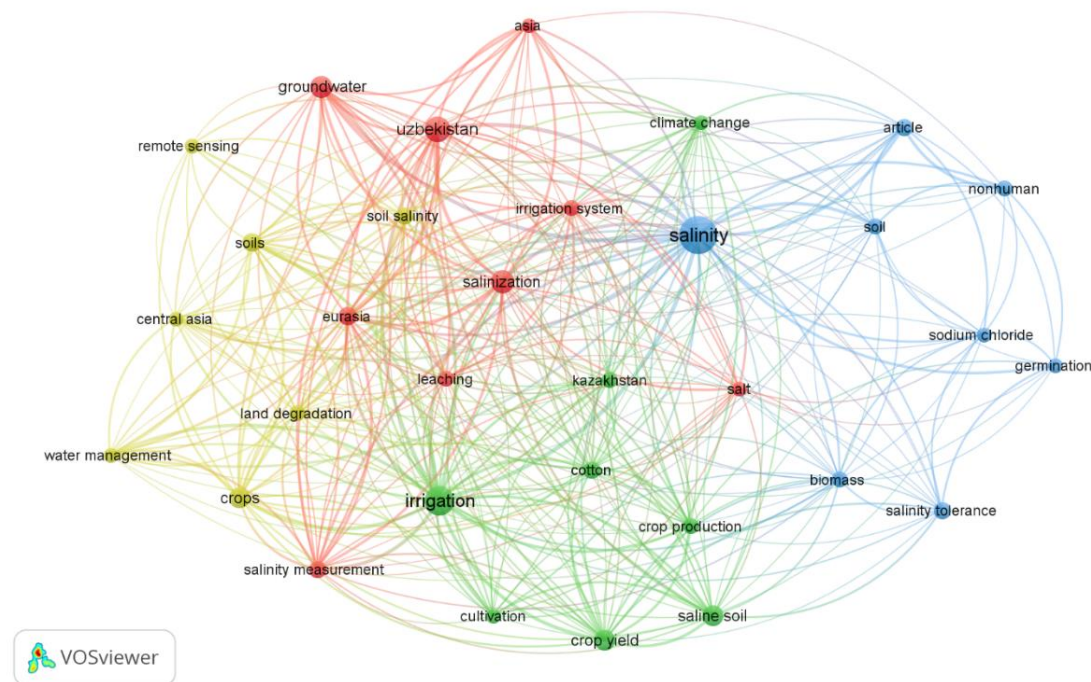


Fig. 9. Network map of top keywords.

Our analysis of the soil salinity publications for Central Asia countries during the mentioned period has shown that almost 40 (6%) publications emphasized the role of drainage. From one to nine papers were published between 2000–2022 on soil salinity issue. During the period of analysis, the pick of publications was reached in 2020, the number of papers amounted to 9. The drainage system based papers were published in 22 different journals with the high reputation. Almost 32 authors from different countries took a part in preparation of those research papers (Fig. 10).

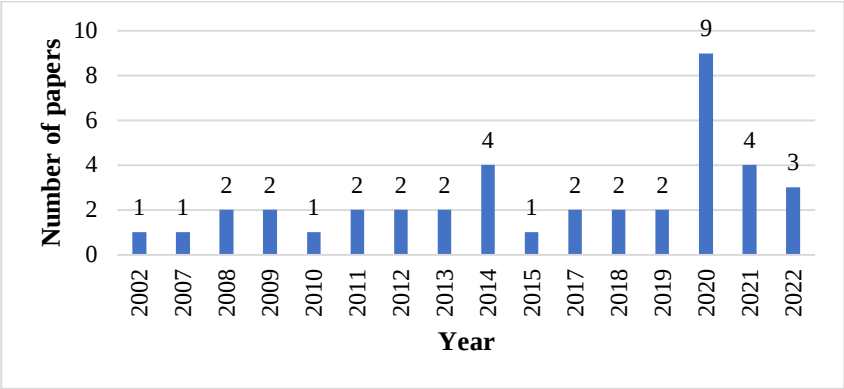


Fig. 10. Drainage based papers on soil salinity in Central Asia.

This bibliometric analysis showed that articles published for over 20 years had the highest results on soil salinity studies in the last 5 years. Based on the research findings in Central Asia, Uzbekistan is at the forefront in terms of top institutions, top authors, and top cited publications in the field of soil salinity research. “Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural Mechanization Engineers” of the National Research University is at the top of the ranking with 95 articles. It is due to the fact that this institution has consistently been ranked as the number one in Uzbekistan in recent times. Nonetheless, Germany, China, and Kazakhstan are the primary financial backers for this timeframe. There may be a significant reason for this, since these countries have a large number of highly regarded research centers and uni-

versities. The territories of Central Asia of the irrigated lands are silted to varying degrees (Juliev et al., 2022). Soil salinization in Central Asia negatively impacts not only agriculture, but also various other aspects such as historical monuments, fortresses, buildings, electric wires, roads, pastures, and both human and animal communities, leading to substantial economic losses for the countries in the region (Gafurova, Juliev, 2021; Makhkamova et al., 2022). To solve the above problem, underlying all systems of measures to combat salinity and waterlogging in irrigated lands is a set of measures to prevent these negative situations. Among the many methods and techniques developed and tested in science and practical experiments to combat soil salinization, three are of great importance the following: drainage, high-quality land leveling (planning) and salt washing activities (Li et al., 2022). The operation of the drainage system is very important during quality land leveling (planning) and salt washing activities. Nearly all of the sown area, and most of it under industrial crops, is irrigated land, which is serviced by a powerful state drainage system (Kannazarova et al., 2021). Based on the quantitative analysis, it appears that the contexts are “salinity” with 61 documents representing 9.2% of the total count, followed by “irrigation” (38 documents), “Uzbekistan” (29 documents), “salinization” (25 documents). In this research, it is clear that almost 80% of the articles concern the deterioration of land reclamation related to the soil salinity. In the given data, groundwater levels have risen in Central Asia countries due to the lack of technical control in the drainage system (Balla et al., 2014), (Ayars et al., 2006), (Drovovozova et al., 2021). Insufficient attention to the technical monitoring of the drainage system in irrigated lands leads to the increase in soil salinity. This will result in more severe salinization of irrigated lands in the future. The main part of the irrigated lands in Central Asia is saline or is under the threat of salinization. Over half of the irrigated lands are characterized by the unsatisfactory and slightly satisfactory ameliorative condition. Irrigated lands of Turkmenistan are subjected to the most active processes of anthropogenic (secondary) salinization, on the territory of which saline soils occupy 80–90% of the area. In Uzbekistan, salinization affects about 60% of irrigated land, in Kyrgyzstan – 12%, in Tajikistan – 18% (Qadir et al., 2009; Çakir, 2020). The salinity of irrigated soils in Central Asia varies due to different origins: residual saliniza-

tion, resulting from the original natural salinity of soils and rocks; secondary hydrogenous salinization, caused by the rise of groundwater or changes in the water regime of soils; and, finally, salinization associated with the influx of salts from the atmosphere and with irrigation waters. The first type of salt genesis prevails on newly irrigated lands; the second and third appear on the lands under both long-term and recent irrigation. The composition of salts and the degree of salinization of the irrigated soils of Central Asia vary greatly. Sulfate salinization is the main form of salt accumulation in continental regions with active desalinization processes. Regions where salt builds up at the end of irrigation and where marine sediments are found, even ancient ones, are known for chloride salt contamination. Soda spots in temporary zones are linked to the natural salt buildup in desert areas. In Tajikistan and Kyrgyzstan, there is evidence of consistent soda salinization in areas where hydrocarbonate-sodium waters are found. There is a risk of increased secondary salinization on the majority of irrigated lands in Central Asia, especially on areas where an irrigation-hydromorphic system has been implemented. In Central Asia, this system causes salt buildup on irrigated lands due to an increase in water rates in irrigation areas or in the drainage water discharge zone, which is inevitable. This, in turn, will inevitably lead to the activation of salt accumulation in soils and in the region as a whole. Salinization is also facilitated by the construction of a collector-drainage network, which involves deep-seated salt reserves and carries them into rivers, lakes and other bodies of water.

Soil Salinity in Central Asia

In the XX century, the method of watering of irrigated lands in Central Asia cannot be considered as effective enough, which can lead to a reduction of irrigated lands and an increase in salinity. Also, the dried-up Aral Sea has lost its role as a regulator of climate and geochemical runoff and has become a source of soil salinization, due to the aeolian transfer of salts to the surrounding lands. This led to a deterioration of the environmental situation in the region and created new environmental and economic problems in Central Asia. The negative environmental processes were also facilitated by the complex socio-political situation in the region that arose after the collapse of the

USSR. Until 1991, the republics of Central Asia were part of a single state. After the collapse of the USSR, the situation changed. This affected, first of all, water resources. Uzbekistan and Turkmenistan are particularly acutely experiencing a shortage of irrigation water. We attribute the development of secondary salinization in the region to old problems that arose as a result of the widespread development of irrigation in the XX century, which determined the transfer of automorphic soils to hydromorphic ones. We attribute environmental, social, and economic problems, that arose at the end of the XX and the beginning of the XXI centuries in connection with the drying up of the Aral Sea and the collapse of the USSR, to new problems. All of the above testifies to the fact that the lands in Central Asia are undergone degradation processes that aggravate the reclamation situation. Despite drainage facilities and other measures, aimed at improving the reclamation of irrigated lands, the proportion of land in satisfactory and unsatisfactory condition has not changed much in recent years.

CONCLUSIONS

This work is focused on soil salinity progress, research hotspots, and possible research directions in regions of Central Asia from 2000 to 2022 using bibliometric approaches based on the online Scopus database. In this bibliometric analysis, we have collected, reviewed, and analyzed 661 publications. The continued and rapid growth in the number of articles implies that soil salinity is gaining attention. Uzbekistan contributed the most publications (414), followed by Kazakhstan (222), Germany (125), China (78) and the Russian Federation (59). Between these publications, we can see that most of these articles were written on soil salinity in Uzbekistan and Kazakhstan. Through this analysis, we have seen that the salinization of the lands in Central Asian countries has become very serious and many factors have an influence on it. One of the core problems is the rise in groundwater levels. The main reason for this is that the performance of the drainage system in these countries is very low, and unfortunately, it is oftenly observed that it does not work at all. The lack of attention to the technical monitoring of the drainage system on irrigated lands provokes the main causes of soil salinity. This will lead to further salinization of irrigated lands in the future. Such a neglect may result in land fallout in

the future, and affect not only agriculture, but also human health, animal loss, and political and economic difficulties in the Central Asian countries. The important reasons for this may be the inadequate data exchange system, the lack of international cooperation and consequent lack of joint projects. Proper management of all these issues can lead to more international collaborative projects and new publications, not only on soil salinity but also in other spheres. These issues should be addressed in the future. In addition, international research on soil salinity would benefit from increased scientific exchange on this topic, especially between emerging and developed countries, between agricultural and soil salinity and drainage science, and between stakeholders and scientists.

REFERENCES

1. Abduraimova D., Ibragimova Z., Otakhonov M. et al., Deformation processes in open drainages, *E3S Web Conf.*, 2021, Vol. 264, 03010.
2. Aimbetov I., Bekimbetov R., Engineering and geoeological assessment of soils salinity in Nukus using GIS technologies, *E3S Web Conf.*, 2021, Vol. 265, 03006.
3. Ayars J.E., Christen E.W., Hornbuckle J.W., Controlled drainage for improved water management in arid regions irrigated agriculture, *Agricultural Water Management*, 2006, Vol. 86, pp. 128–139.
4. Balla D., Omar M., Maassen S. et al., Efficiency of duckweed (*Lemnaceae*) for the desalination and treatment of agricultural drainage water in detention reservoirs., 2014, pp. 423–440.
5. Begmatov I., Matyakubov B., Akhmatov D. et al., Analysis of saline land and determination of the level of salinity of irrigated lands with use of the geographic information system technologies, *ICIGIS*, 2020, Vol. 26, pp. 309–316.
6. Bezak N., Mikoš M., Borrelli P. et al., Soil erosion modelling: A bibliometric analysis, *Environmental Research*, 2021, Vol. 197, 111087.
7. Bezborodov G.A., Shadmanov D.K., Mirhashimov R.T. et al., Mulching and water quality effects on soil salinity and sodicity dynamics and cotton productivity in Central Asia, *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2010a, Vol. 138, pp. 95–102.
8. Bezborodov G.A., Shadmanov D.K., Mirhashimov R.T. et al., Mulching and water quality effects on soil salinity and sodicity dynamics and cotton productivity in Central Asia, *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2010b, Vol. 138, pp. 95–102.

9. Çakir R., *Waterlogging and Soil Salinity Problems under Conditions of Arid Environment*, 2020, pp. 1-8.
10. Charzyński P., Urbańska M., Franco Capra G. et al., A global perspective on soil science education at third educational level; knowledge, practice, skills and challenges, *Geoderma*, 2022, Vol. 425, 116053.
11. di Santo N., Russo I., Sisto R., Climate Change and Natural Resource Scarcity: A Literature Review on Dry Farming, *Land*, 2022, Vol. 11, 2102.
12. Drovovozova T.I., Mariach S.A., Panenko N.N., Technical solutions for cleaning drainage water from irrigated areas, *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 2021, Vol. 677, 042094.
13. Duan Y., Ma L., Abuduwaili J. et al., Driving factor identification for the spatial distribution of soil salinity in the irrigation area of the Syr Darya River, Kazakhstan, *Agronomy*, 2022, Vol. 12, 1912.
14. Egamberdieva D., Alleviation of salt stress by plant growth regulators and IAA producing bacteria in wheat, *Acta Physiol. Plant*, 2009, Vol. 31, pp. 861–864.
15. Egamberdieva D., Hashem A., Abd-Allah E.F., *Biological control of fungal disease by rhizobacteria under saline soil conditions*, 2014, pp. 161–172.
16. Egamberdieva D., Kamilova F., Validov S. et al., High incidence of plant growth-stimulating bacteria associated with the rhizosphere of wheat grown on salinated soil in Uzbekistan, *Environ. Microbiol.*, 2007, Vol.10(1), pp. 1–9.
17. Egamberdieva D., Kucharova Z., Selection for root colonising bacteria stimulating wheat growth in saline soils, *Biol. Fertil. Soils*, 2009, Vol. 45, pp. 563–571.
18. Egamberdieva D., Renella G., Wirth S. et al., Secondary salinity effects on soil microbial biomass, *Biol. Fertil. Soils*, 2010, Vol. 46, pp. 445–449.
19. Egamberdieva D., Wirth S., Bellingrath-Kimura S.D. et al., Salt-tolerant plant growth promoting rhizobacteria for enhancing crop productivity of saline soils, *Front. Microbiol.*, 2019, Vol. 10, 2791.
20. Egamberdieva D., Wirth S.J., Shurigin V.V. et al., Endophytic bacteria improve plant growth, symbiotic performance of chickpea (*Cicer arietinum* L.) and induce suppression of root rot caused by *Fusarium solani* under salt stress, *Front. Microbiol.*, 2017, Vol. 8, 1887.
21. Elhaj M., Hashan M., Hossain M.E., *A critical review and future trend on relative permeability hysteresis*, 2018,
22. Forkutsa I., Sommer R., Shirokova Y.I. et al., Modeling irrigated cotton with shallow groundwater in the Aral Sea Basin of Uzbekistan: II, Soil salinity dynamics, *Irrig. Sci.*, 2009, Vol. 27, pp. 319–330.
23. Gafurova L., Juliev M., Soil degradation problems and foreseen solutions in Uzbekistan, In: *Regenerative Agriculture*, 2021, pp. 59–67.

24. Gao J., Faheem M., Yu X., Global research on contaminated soil remediation: A bibliometric network analysis, *Land*, 2022, Vol. 11, 1581.
25. Ghasemi M., Shafiei A., Foroozesh J., A systematic and critical review of application of molecular dynamics simulation in low salinity water injection, *Advances in Colloid and Interface Science*, 2022, Vol. 300, 102594.
26. Ibrakhimov M., Martius C., Lamers J.P.A. et al., The dynamics of groundwater table and salinity over 17 years in Khorezm, *Agricultural Water Management*, 2011, Vol. 101, pp. 52–61.
27. Iovcheva A.D., Semenov I.N., Assessment of the barrier function of Chernozem and Luvisol under their experimental contamination by copper ions, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2023, Vol. 116, pp. 76–108, DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2023-116-76-108>.
28. Ivushkin K., Bartholomeus H., Bregt A.K. et al., Global mapping of soil salinity change, *Remote Sensing of Environment*, 2019b, Vol. 231, 111260.
29. Jalankuzov T., Suleimenov B., Busscher W.J. et al., Irrigated cotton grown on sierozem soils in South Kazakhstan, *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2013, Vol. 44, pp. 3391–3399.
30. Juliev M., Gafurova L., Ergasheva O. et al., Land Degradation Issues in Uzbekistan, In: *Environmental Degradation in Asia*, 2022, pp. 163–176.
31. Kannazarova Z., Balabanov V.I., Lee A., Advanced method for cleaning horizontal closed drainage, *Prirodobustroystvo*, 2021, pp. 36–40.
32. Karimov A.Kh., Šimůnek J., Hanjra M.A. et al., Effects of the shallow water table on water use of winter wheat and ecosystem health: Implications for unlocking the potential of groundwater in the Fergana Valley (Central Asia), *Agricultural Water Management*, 2014, Vol. 131, pp. 57–69.
33. Kannazarova Z., Juliev M., et al., Groundwater in the commonwealth of independent states: A bibliometric analysis of scopus-based papers from 1972 to 2023, emphasizing the significance of drainage, *Groundwater for Sustainable Development*, 2024, Vol. 25, pp. 101083.
34. Kannazarova Z., Juliev M. et al., Drainage in irrigated agriculture: Bibliometric analysis for the period of 2017–2021, *Agricultural Water Management*, 2024, Vol. 305, pp. 109118.
35. Khasanov S., Juliev M., Uzbekov U. et al., Landslides in Central Asia: a review of papers published in 2000–2020 with a particular focus on the importance of GIS and remote sensing techniques, *GeoScape*, 2021, Vol. 15, pp. 134–145.
36. Khasanov S., Li F., Kulmatov R. et al., Evaluation of the perennial spatio-temporal changes in the groundwater level and mineralization, and soil salinity in irrigated lands of arid zone: as an example of Syrdarya Province, Uzbekistan, *Agricultural Water Management*, 2022, Vol. 263, 107444.
37. Kulagin V. et al., Groundwater hydro chemical regime and soil salinity

under long-term operation on Tasotkel irrigated and drained lands of Zhambyl region, *Series of geology and technical sciences*, 2019, Vol. 2, № 434, pp. 102–113.

38. Laiskhanov S.U., Smanov Z.M., Kaimuldinova K.D. et al., A study of the effects of soil salinity on the growth and development of maize (*Zea Mays* L.) by using Sentinel-2 Imagery, *OnLine Journal of Biological Sciences*, 2022, Vol. 22, pp. 323–332.

39. Land resources and food security of Central Asia and Southern Caucasus n.d.; 2016, pp. 1–394.

40. Li S., He Z., Zhu P. et al., Experimental study on the triaxial compression properties of coarse-grained filling soil under drying–wetting cycles, *Geofluids*, 2022, pp. 1–14.

41. Liu W., Ma L., Smanov Z. et al., Clarifying soil texture and salinity using local spatial statistics (Getis-Ord Gi* and Moran's I.) in Kazakh–Uzbekistan Border Area, Central Asia, *Agronomy*, 2022, Vol. 12, 332.

42. Makhkamova D., Gafurova L., Nabieva G. et al., Integral indicators of the ecological and biological state of soils in Jizzakh steppe, Uzbekistan, *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 2022, Vol. 1068, 012019.

43. Mardieva D. et al., A Bibliometric Review: Interventions for Enhancing Speaking Skills in non-English-Speaking Contexts, *XL*, 2024, Vol. 17, No. 4, pp. 195–224.

44. Mutalov A. et al., Comprehensive strategies for managing stored grains: Tackling insect infestation and quality loss: A review, *Journal of Stored Products Research*, 2025, Vol. 112, pp. 102624.

45. Qadir M., Noble A.D., Qureshi A.S. et al., Salt-induced land and water degradation in the Aral Sea basin: A challenge to sustainable agriculture in Central Asia, *Natural Resources Forum*, 2009, Vol. 33, pp. 134–149.

46. Ravshanov N., Khurramov I., Aminov S.M., Mathematical modeling of the process of water-saline transport in soils, *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2019, Vol. 1210, 012118.

47. Romanovskaya A.Yu., Savin I.Yu., Modern techniques for monitoring wind soil erosion, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2020, Vol. 104, pp. 110–157, DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-104-110-157>.

48. Ruziyev I.M., Yusupov G.U., Djalilova G.T. et al., *Development of geographic information system (GIS) to change the level of soil salinity in Syrdarya region*, 2022, pp. 1-9.

49. Salimzoda A.F., Mahmadyorzoda U.M., Boimurodov R.B. et al., The salinization problems and soil hydromorphism as components of land desertification, irrigated zone of Tajikistan and the liquidation ways of them, *E3S Web Conf.*, 2021, Vol. 254, 05008.

50. Shirokova Y., Use of electrical conductivity instead of soluble salts for soil

salinity monitoring in Central Asia, *Irrigation and Drainage Systems*, 2000, Vol. 14, pp. 199–206.

51. Sommer R., Glazirina M., Yuldashev T. et al., Impact of climate change on wheat productivity in Central Asia, *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2013, Vol. 178, pp. 78–99.

52. Syshchykov D.V., Berezovskiy A.S., Agurova I.V. The influence of degradation processes on enzymatic activity and the content of forms of mineral nitrogen in agricultural soils, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2024, Vol. 121, pp. 28–46. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2024-121-28-46>.

53. Turdaliev A.T., Yo Darmonov D., Teshaboyev N.I. et al., Influence of irrigation with salty water on the composition of absorbed bases of hydromorphic structure of soil, *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 2022, Vol. 1068, 012047.

54. Ullrich S.M., Tanton T.W., Abdrashitova S.A., Mercury in the aquatic environment: A Review of Factors Affecting Methylation, *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2001, Vol. 31, pp. 241–293.

55. Usmanova R.M., Aral Sea and sustainable development, *Water Science and Technology*, 2003, Vol. 47, pp. 41–47.

56. van der Zee S.E.A.T.M., Stofberg S.F., Yang X. et al., Irrigation and Drainage in Agriculture: A Salinity and Environmental Perspective, In: *Current Perspective on Irrigation and Drainage*, 2017.

57. Ventura Y., Wuddineh W.A., Myrzabayeva M. et al., Effect of seawater concentration on the productivity and nutritional value of annual *Salicornia* and perennial *Sarcocornia* halophytes as leafy vegetable crops, *Scientia Horticulturae*, 2011, Vol. 128, pp. 189–196.

58. Xaliqulov M. et al. Root harvester machine: a review of papers from the Scopus database published in English for the period of 1982–2022, *E3S Web of Conf.*, ed. Tanaino I., Dzholdosheva T, 2023, Vol. 402, pp. 10010.

59. Zhang G., Xie S., Ho Y.-S., A bibliometric analysis of world volatile organic compounds research trends, *Scientometrics*, 2010, Vol. 83, pp. 477–492.

Научное издание

Бюллетень Почвенного института
имени В.В. Докучаева

Выпуск 123

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 25.03.2025 г.
Подписано в печать 25.03.2025 г.
Формат 60×84/16. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 17,6 Тираж 75 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