

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

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

БЮЛЛЕТЕНЬ
ПОЧВЕННОГО ИНСТИТУТА
имени В.В. ДОКУЧАЕВА

Выпуск 125

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 125

**Moscow
2025**

<https://bulletin.esoil.ru>

ББК П03
Б 98
УДК 631.4

Главный редактор:
Иванов А. Л., академик РАН

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

Редакционная коллегия:

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

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

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

Editorial board:

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

СОДЕРЖАНИЕ

Цифровое почвенное картографирование заболоченной равнины юга криолитозоны Западной Сибири на основе мультиспектральной спутниковой съемки и наземных исследований	
Шишконакова Е.А., Автюков Н.А., Чуванов С.В., Жоголев А.В.	6
Серые почвы со вторым гумусовым горизонтом в смешанных лесах Вятского Прикамья	
Прокашев А.М., Матушкин А.С.	42
Пирогенная деградация и потери углерода на выработанном осушенном верховом торфянике	
Анциферова О.А.	78
Почвенные условия биоценозов <i>Quercus pubescens</i> Willd. Южного берега Крыма	
Коба В.П., Новицкий М.Л., Пищеничников Н.А., Нагорняк А.А.	111
Биомасса гумусообразования в национальной модели управления бюджетом углерода в почвах агроэкосистем	
Столбовой В.С., Гребенников А.М., Холодов В.А.,	
Шилов П.М., Духанин Ю.А.	138
Влияние минеральных и органо-минеральных систем удобрения в Геосети многолетних опытов на формирование углеродного баланса в агроэкосистеме	
Занилов А.Х.	157
Дифференцированный отбор образцов почв по глубине в пределах поверхности слоя 0–30 см для мониторинга содержания и запасов органического углерода	
Хитров Н.Б.	181
Содержание и состав органического вещества почв архипелага Новая Земля	
Артемьева З.С., Когут Б.М., Цомаева Е.В.,	
Засухина Е.С., Ярославцева Н.В., Никитин Д.А.	214
Химическое строение органического вещества черноземов типичных при различных технологиях земледелия	
Фарходов Ю.Р., Данилин И.В., Белобров В.П., Ермолаев Н.Р.,	
Юдин С.А., Надуткин И.А., Стройкова М.Н., Хаматнуров Ш.А.,	
Лазарев В.И., Холодов В.А.	244
Элементный состав гумусовых кислот чернозема типичного целинного	
Беляева С.А., Мамонтов В.Г., Поляков А.М.	274

Глобальные тренды в исследованиях на основе модели RUSLE: библиометрический анализ с использованием R Biblioshiny и VOSviewer	
<i>Kholmurodova M., Juliev M., Bakhodirova Sh., Abdikairov B., Israilov I., Rashidov Ja.</i>	293
Полнотекстовая база данных “Выдающиеся почвоведы России”: создание, назначение, использование	
<i>Бунин М.С., Коленченко И.А., Пирумова Л.Н., Непочатых А.Ю., Кадилина Е.П.</i>	328

CONTENTS

Digital soil mapping of the boggy plain in the south of the cryolithozone of West Siberia based on multispectral satellite imagery and on-ground soil studies

Shishkonakova E.A., Avetov N.A., Chuvanov S.V., Zhogolev A.V. 6

Gray soils with a second humus horizon in the mixed forests of the Vyatka-Kama region

Prokashev A.M., Matushkin A.S. 42

Pyrogenic degradation and carbon loss in cut-over drained peatland

Antsiferova O.A. 78

Soil conditions of biocenoses *Quercus pubescens* Willd. of the Southern coast of Crimea

Koba V.P., Novitsky M.L., Pshenichnikov N.A., Nagornyyak A.A. 111

Biomass of humus formation in the national model of carbon budget management in soils of agroecosystems

Stolbovoy V.S., Grebennikov A.M., Kholodov V.A.,

Shilov P.M., Dukhanin Yu.A. 138

The influence of mineral and organo-mineral fertilizer systems in the Geonet of long-term experiments on the formation of carbon balance in the agroecosystem

Zanilov A.Kh. 157

Differential soil sampling by depth within surface layer 0–30 cm for monitoring of content and storage of soil organic carbon

Khitrov N.B. 181

Content and composition of organic matter in soils of the Novaya Zemlya archipelago

*Artemyeva Z.S., Kogut B.M., Tsomaeva E.V., Zasukhina E.S.,
Yaroslavtseva N.V., Nikitin D.A.* 214

The chemical structure of the organic matter of typical chernozems of various farming technologies

*Farkhodov Yu.R., Danilin I.V., Belobrov V.P., Ermolaev N.R.,
Yudin S.A., Stoikova M.N., Hamatnurov Sh. A., Ilyin B.S.,
Lazarev V.I., Kholodov V.A.* 244

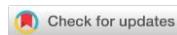
The elemental composition of humic acids in typical virgin chernozem
Belyaeva S.A., Mamontov V.G., Polyakov F.M. 274

Global research trends on RUSLE model: Bibliometric analysis using R
Biblioshiny and VOSviewer

*Kholmurodova M., Juliev M., Bakhodirova Sh., Abdikairov B.,
Israilov I., Rashidov Ja.* 293

Full-text database “Outstanding soil scientists of Russia”: creation, purpose and use

*Bunin M.S., Kolenchenko I.A., Pirumova L.N.,
Nepochatykh A.Yu., Kadilina E.P.* 328



Ссылки для цитирования:

Шишконакова Е.А., Аветов Н.А., Чуванов С.В., Жоголев А.В. Цифровое почвенное картографирование заболоченной равнины юга криолитозоны Западной Сибири на основе мультиспектральной спутниковой съемки и наземных исследований // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2025. Вып. 125. С. 6-41. DOI: 10.19047/0136-1694-2025-125-6-41

Cite this article as:

Shishkonakova E.A., Avetov N.A., Chuvanov S.V., Zhogolev A.V., Digital soil mapping of the boggy plain in the south of the cryolithozone of West Siberia based on multispectral satellite imagery and on-ground soil studies, Dokuchaev Soil Bulletin, 2025, V. 125, pp. 6-41, DOI: 10.19047/0136-1694-2025-125-6-41

Благодарность:

Авторы выражают признательность академику И.Ю. Савину за помощь в подготовке материалов к статье и просмотр рукописи, Дирекции природного парка “Нумто” в лице директора Л.А. Матвеевой и научного сотрудника Е.Л. Веревкиной за поддержку в работе и предоставленные материалы. Исследование выполнено в рамках государственных заданий Почвенного института имени В.В. Докучаева и МГУ имени М.В. Ломоносова.

Acknowledgments:

The authors express their gratitude to Academician I.Yu. Savin for assistance in preparing the materials for this article and reviewing the manuscript. The Administration of Numto Nature Park, represented by Director L.A. Matveeva and researcher E.L. Verevkina, are grateful for their support and the materials they provided. This study was conducted within the framework of state assignments of Lomonosov Moscow State University and Dokuchaev Soil Science Institute.

**Цифровое почвенное картографирование
заболоченной равнины юга криолитозоны
Западной Сибири на основе мультиспектральной
спутниковой съемки и наземных исследований**

© 2025 г. Е. А. Шишконакова^{1*}, Н. А. Аветов²,
С. В. Чуванов^{1,2**}, А. В. Жоголев^{1***}

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

*e-mail: shishkonakova_ea@esoil.ru,

**<https://orcid.org/0000-0003-0458-2602>,

***<https://orcid.org/0000-0003-2225-7037>.

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

Поступила в редакцию 24.10.2024, после доработки 08.11.2024,
принята к публикации 16.09.2025

Резюме: Детальные почвенные карты заболоченных равнин севера Западно-Сибирской низменности до сих пор отсутствуют, несмотря на растущее внимание к этому региону со стороны экологов в связи с потеплением климата и его экстенсивным освоением нефтегазодобывающим комплексом. Территория природного парка “Нумто” была выбрана в качестве полигона для исследования возможности почвенного картографирования заболоченных равнин как весьма характерная по набору представленных ландшафтов, свойственных северо-таежной и лесотундровой зонам Западной Сибири, включающему как бореальные, так и мерзлые болотные системы. При составлении почвенной среднемасштабной карты были использованы традиционные методы почвенной съемки и геоботанической индикации почв, а также методы цифрового картографирования почв, основанные на применении машинного обучения. В качестве основы картографирования были выбраны два спутниковых многозональных снимка Landsat-8 с размером пикселя 30 м на местности от 8 сентября 2023 г. Информативность почвенной карты была повышена за счет включения в состав легенды торфяных мезотрофных почв, а также почв влажных регрессивных болот и хасырейных ландшафтов. Для верификации составленной карты было осуществлено: 1) ее сопоставление с 30 детальными почвенными картами микроключей бассейна Казыма; 2) оценка точности с использованием случайных стратифицированных точек (stratified random points); 3) точечное повторное наземное обследование. Точность карты по разным оценкам составила от 75.0% до 78.4%. Наибольшую сложность вызывает картографирование почв мелкоконтурных плоскобугристых торфяников, чередующихся с талыми комплексными болотами с доминированием лишайников на повышенных элементах болотного рельефа. Доминирующим компонентом почвенного покрова на территории парка

выступают талые олиготрофные торфяные почвы (доля в составе почвенного покрова 43.5%). Сочетания олиготрофных торфяных почв плоскобугристых и крупнобугристых комплексов занимают 11.3%; подзолы – 13.3%; комплексы олиготрофных торфяных (в том числе влажных регрессивных) и мезотрофных торфяных почв – 8.3%; мезотрофные почвы – 7.1%.

Ключевые слова: почвенные карты; почвы болот; верификация карт; состав почвенного покрова; природный парк “Нумто”.

Digital soil mapping of the boggy plain in the south of the cryolithozone of West Siberia based on multispectral satellite imagery and on-ground soil studies

© 2025 E. A. Shishkonakova^{1*}, N. A. Ayetov², S. V. Chuvanov^{1,2**},
A. V. Zhogolev^{1***}

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

^{*}e-mail: shishkonakova_ea@esoil.ru,

^{**}<https://orcid.org/0000-0003-0458-2602>,

^{***}<https://orcid.org/0000-0003-2225-7037>.

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

Received 24.10.2024, Revised 08.11.2024, Accepted 16.09.2025

Abstract: Soil mapping of the boggy plains of the north of the West Siberian Lowland still remains poorly developed, despite the growing attention to this region from environmentalists due to global warming and its extensive development by the oil and gas producing complex. The territory of the Numto Nature Park was chosen as a testing ground for studying the possibility of soil mapping of boggy plains as it is very typical in terms of the set of presented landscapes inherent in the northern taiga and forest-tundra zones of Western Siberia, including both boreal and frozen bog systems. When compiling the medium-scale soil map, traditional methods of soil survey and geobotanical indication of soils, as well as digital cartography methods based on machine learning were used. Two Landsat-8 multispectral satellite images with a pixel size of 30 meters on the ground from September 8, 2023, were selected as the basis for mapping. The information content of the soil map was increased by including peat mesotrophic soils, as well as soils of wet

regressive bogs and khasyrei landscapes (dry lake beds) in the legend. To verify the compiled map the following were performed: 1) its comparison with 30 detailed soil maps of the Kazym basin microkeys; 2) accuracy assessment in the SCP plugin with creation of stratified random points; 3) point repeat ground survey. The accuracy of the map, according to various estimates, ranged from 75.0% to 78.4%. The greatest difficulty is in mapping the soils of small-flat-mound peatlands alternating with thawed complex bogs with dominance of lichens on elevated elements of the bogs. The dominant component of the soil cover in the park is thawed oligotrophic peat soils (share in the soil cover composition is 43.5%). Combinations of oligotrophic peat soils of palsal complexes occupy 11.3%, podzols – 13.3%; complexes of oligotrophic peat (including wet regressive) and mesotrophic peat soils – 8.3%, mesotrophic soils – 7.1%.

Keywords: soil maps; bog soils; map verification; soil cover composition; Numto Nature Park.

ВВЕДЕНИЕ

Картографирование почв в Западной Сибири на протяжении всей своей истории было неразрывно связано с характером землепользования, практиковавшимся в различных ее частях и, в частности, со степенью их земледельческой освоенности. В то время как степные, лесостепные и отчасти южнотаежные регионы Западно-Сибирской низменности в течение XX в. (начиная с деятельности Переселенческого управления министерства земледелия Российской Империи) оказались охвачены масштабными почвенно-географическими изысканиями, необходимыми для интенсификации сельскохозяйственного производства, северные территории таежной зоны до конца 1950-х годов практически выпали из сферы внимания почвоведов. Начавшиеся в 1960-х годах почвенные исследования в неосвоенных бореальных районах Западной Сибири ограничивались разрозненными маршрутными наблюдениями, часто затрудняемыми отсутствием транспортной доступности территории. Опубликованные по их результатам работы показали, что наибольшую сложность представляет собой генетическая интерпретация крайне слабого проявления подзолистого процесса на суглинисто-глинистых породах или полного его отсутствия (Долгова, Гаврилова, 1971; Караваева, 1973; Ковалев и др., 1974; Уфимцева, 1974; Гаджиев, Овчинников, 1977; Фирсова,

1977; Добровольский и др., 1981). С другой стороны, несмотря на высокую заболоченность центра Западно-Сибирской низменности, проблемы диагностики, систематики и географии торфяных болотных почв не получили широкого обсуждения. Среди затронутых авторами аспектов болотного почвоведения следует обратить внимание на предложение Н.А. Караваевой (1973) разделять распространенные и минерализованные торфяники; указания К.А. Уфимцевой (1974) на целесообразность при почвенно-картографических работах на заболоченных территориях сопоставлять и совмещать картографические материалы, полученные болотоведами, геоботаниками и специалистами торфоразведки; а также представления В.П. Фирсовой (1977) о преобладании болотных переходных почв над низинными при повсеместном распространении болотных верховых почв в северном Зауралье. Картографирование почв в регионе активизировалось значительно позже, уже на рубеже XX и XXI вв., преимущественно в нефтедобывающих районах ХМАО-Югры и ЯНАО (Терещенков и др., 1991; Аветов, Трофимов, 1997; Смоленцев, 2002; Грибов и др., 2004; Коркина и др., 2016; Аветов и др., 2017; Шишконакова и др., 2020). Несомненно, большое значение для познания почвенно-географических закономерностей в boreальной зоне России (на примере ее европейской части) имела и монография С.В. Горячина “Почвенный покров Севера” (2010). В дальнейшем применение обновленного варианта классификации торфяных почв позволило разработать подробную легенду к серии детальных почвенных карт (микроключей) заболоченной равнины бассейна Казыма (Аветов и др., 2022). Из 33 представленных в легенде единиц картографирования 30 обозначали торфяные почвы. Это, в частности, позволило в определенной мере преодолеть традиционно существующие взгляды на почвенный покров крупных водоразделов с торфяными почвами как относительно просто организованный (Фридланд, 1984).

Следует подчеркнуть, что востребованность почвенно-картографических материалов на севере таежной зоны Западной Сибири в настоящее время особенно возрастает в связи, с одной стороны, с экстенсивным освоением нефтегазодобывающим комплексом все новых территорий и, с другой стороны, с резко увеличивающимся общественным и научным интересом к роли бо-

лотных и таежных экосистем в балансе углерода на фоне прогрессирующего потепления климата региона.

Цель настоящей статьи – выявить возможности цифровой почвенной картографии, основанной на материалах мультиспектральной спутниковой съемки и выборочных наземных почвенных исследованиях, в отображении пространственного распределения почв и почвенных комбинаций boreальной заболоченной равнины на примере природного парка “Нумто” и сопредельных территорий. Апробированная методика позволит в дальнейшем применить ее к картографированию почв заболоченных равнин – ландшафта, имеющего широкое распространение на севере Западной Сибири.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектом данного исследования послужила территория природного парка “Нумто”, под которой в данной работе понимается собственно территория парка с некоторыми прилегающими к нему местностями, в разное время входившими в его границы. Согласно Федеральному закону от 21.04.2025 № 97-ФЗ “О государственной поддержке предпринимательской деятельности в Арктической зоне Российской Федерации” территория парка “Нумто”, как и весь Белоярский район ХМАО-Югры, входит в Арктическую зону РФ.

Природный парк “Нумто” расположен на севере Ханты-Мансийского округа – Югры, в подзоне северной тайги, и простирается от северного макрослона Сибирских увалов на юге до Полуйской возвышенности на севере, захватывая их части. Центральная часть парка представляет собой заболоченную равнину. В соответствии с почвенно-экологическим районированием России его территория относится к Нижнеобской провинции болотных почв и таежных глееземов северо-таежной подзоны Европейско-Западно-Сибирской таежно-лесной почвенно-биоклиматической области (Добровольский, Урусевская, 2004). Структура почвенного покрова парка во многом определяется его высокой заболоченностью, наличием мерзлотных почв, большим количеством озер разного размера и происхождения. Кроме того, весьма разнообразный генезис почвообразующих пород территории парка “Нумто” обусловлен сложной геологической историей, включаю-

щей морские трансгрессии, оледенения, аллювиально-озерную и водно-ледниковую деятельность, торфонакопление, проявления криогенеза. Как и на большей части пространства Западно-Сибирской низменности, амплитуда вертикального расчленения крайне невелика и не превышает 70 м (уклионы составляют менее 1.0 м на 1 км) (Валеева и др., 2008). Территория парка отличается относительно развитой гидрологической сетью, включающей бассейн реки Казым с его притоками Куръёх, Соромказым, Сюньюган, Ай-Куръёх, Хоръёхан и др., и истоки реки Надым с его притоками Хеттой и Ай-Надымом. Также для парка характерно большое количество озер, особенно на его востоке и северо-востоке, прежде всего в районе, прилегающем к озеру Нуумто.

Расположение парка “Нумто” на границе соприкосновения талых и мерзлых болотных ландшафтов на Западно-Сибирской равнине определяет уникальность его природы. Одной из особенностей является присутствие на территории парка ландшафтов тундрового типа, во многом сходных с ерниково-кустарничково-лишайниковыми тундрами, характерными для более северных районов, в том числе для полуостровов Тазовский и Ямал (Московченко, Козин, 2017).

Таким образом, выраженный равнинный рельеф и преобладание водно-болотных ландшафтов, отличающихся высоким разнообразием, включающим, в том числе, мерзлые, преимущественно плоскобугристые болота, позволяют использовать территорию парка “Нумто” как потенциальный полигон для исследования возможности картографирования заболоченных равнин севера Западной Сибири.

В основе традиционных (наземных) методов построения карты лежат как приемы собственно почвенной съемки (Евдокимова, 1987), так и ландшафтно-индикационные связи, позволяющие во многих случаях использовать дешифровочные признаки растительности на космических снимках для достоверного распознавания почвенных выделов. Особенностью торфяных почв, как известно, является их всецелая обусловленность растительным покровом болот, определяемая тем обстоятельством, что, как правило, современная растительность соответствует по ботаническому составу основной массе торфа в пределах почвенного профиля.

В частности, устойчивые индикационные связи обнаруживаются между трофностью растительности и типовой принадлежностью почв по способам минерального питания (олиготрофные, мезотрофные, эвтрофные почвы). Учитывая, что различные таксономические единицы почв отличаются определенной приуроченностью к условиям увлажнения, а геоботаническая индикация при этом позволяет выявить этот фактор на его значительном градиенте и по широкому спектру видов растений, растительность и в этом отношении выступает в качестве значимого индикатора состава почвенного покрова.

Традиционные методы картографирования в настоящей работе сочетались с методами цифровой почвенной картографии, основанными на использовании машинного обучения (Heung et al., 2016; Wadoux et al., 2020). Для моделирования и верификации моделей было заложено 211 точек, обеспеченных разрезами (колонками торфяных почв) и геоботаническими описаниями, сосредоточенных в южной части парка (табл. 1). Северная его половина в связи с транспортной недоступностью не была охвачена наземными исследованиями. Каждая точка включала описание почвенного профиля и геоботаническое описание. Расположение и подбор точек отражали ландшафтное разнообразие района исследования.

Основой анализа послужили два спутниковых многозональных снимка Landsat-8 с размером пикселя 30 м на местности от 8 сентября 2023 г. Оба снимка были сделаны в одно и то же время и датированы одним и тем же днем, что позволило их объединить в пределах границ парка “Нумто”. Такие снимки широко используются для создания и актуализации почвенных цифровых карт boreальных и арктических районов (Каверин и др., 2012; Векшина; 2019, Ахметова, Токарев, 2020). Дополнительным источником информации послужила карта растительности парка “Нумто” масштаба 1 : 100 000 под редакцией Д.В. Московченко 2023 г., предоставленная дирекцией парка.

Цифровая почвенная карта создавалась в программе QGIS 3.34 с применением плагина Semi-Automatic Classification Plugin (SCP) в прямоугольной системе координат UTM для зоны 42N северного полушария на основе геодезической системы WGS 84 (EPSG:32642). Обучающая выборка состояла как из точек, охва-

ченных полевыми описаниями, так и из точек, которые были визуально экспертно отдешифрированы по изображению. Всего выборка составила 334 группы пикселей (зон интереса, Region of Interest, ROI), представляющих 12 классов (единиц картографирования) легенды. Для построения карты использовалась классификация с обучением (supervised classification) по всем каналам снимка (с 1 по 6) с использованием подхода случайных деревьев (Random Forest) для распределения пикселей по классам (van der Westhuizen et al., 2023). Количество деревьев составляло 100 (Belgiu, 2016), большее число деревьев для данной карты не приводило к существенному улучшению точности, но значительно замедляло ее построение, остальные настройки были заданы по умолчанию.

Согры рек (эвтрофные и мезо-эвтрофные древесные пойменные болота), пойма реки Казым дешифрировались визуально вручную и были наложены на цифровую карту. Такой прием использовался в связи с тем, что растительный покров согр не отличался по спектральным характеристикам от растительности, развивающейся на глееземах. На эту проблему при идентификации лесных мезо- и эвтрофных болот обращают внимание и И.Е. Терентьева с соавторами (2020), отмечая, что их спектральные характеристики практически идентичны с лесными массивами, при том что использование вегетационных индексов в этом случае также не дает хороших результатов, поскольку значения индекса сходны для обоих типов объектов.

Аналогичным образом вручную были установлены границы почвенных контуров визуально хорошо различимых ландшафтов хасырейного типа, приуроченных к озерным котловинам. Представленные в хасыреях почвенные комбинации включают компоненты инициального болотного почвообразования на свежих озерных отложениях, более не встречающиеся в других ландшафтах парка.

Для верификации построенной карты были использованы три метода:

1) *Оценка точности в плагине SCP с созданием случайных стратифицированных точек (stratified random points)* производилась на снимках более высокого разрешения, чем Landsat (были использованы космические снимки Google, Bing, Yandex, предла-

гаемые программой SAS.Planet), для всей картографируемой территории. Для оценки точности выборка составила 398 пикселей, распределенных по 12 классам легенды в соответствии с их весом. Подробное описание этой методики и используемые формулы приводятся в статье R. Olofsson с соавторами (2014). После экспертной интерпретации всех этих пикселей полученный векторный слой накладывался на цифровую карту парка “Нумто”, и плагин подсчитывал статистические характеристики изображения: точность производителя, точность пользователя, площади, стандартные ошибки, доверительный интервал для каждого класса легенды, а также общую точность для всей карты.

2) *Оценка точности цифровой почвенной карты проводилась с использованием детальных почвенных карт масштаба 1 : 5 000, построенных традиционными методами при полевых обследованиях, для 30 ключевых участков, в основном покрывающих разнообразие почв южной части парка (за исключением почв хасыреев и поймы Казыма) (рис. 1). Детальные карты были генерализованы до пространственного разрешения 30 м. По ним была построена независимая проверочная выборка.*

3) *Оценка точности построенной карты с использованием полевой верификации проводилась на основе 45 точек (рис. 1), заложенных случайным образом в разных ландшафтах южной части парка “Нумто” в августе 2024 г. Для каждого ключевого участка описывался ландшафт, характерные для него почвы и растительный покров. Затем полученные точки были наложены на цифровую почвенную карту.*

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

По своему содержанию легенда к почвенной карте природного парка “Нумто” составлялась в соответствии с подходами, применяемыми при среднемасштабной почвенной съемке. В качестве основы легенды нами была выбрана легенда к почвенной карте микроключей (Аветов и др., 2022), однако, учитывая гораздо меньший масштаб создаваемой карты, было проведено укрупнение единиц картографирования, выразившееся в исключении видов и подвидов торфяных почв по ботаническому составу и степени разложения торфа из содержания легенды и в объединении ви-

дов по мощности торфяной залежи с указанием преобладающих таксонов (например, торфяные преимущественно среднемощные и мощные).

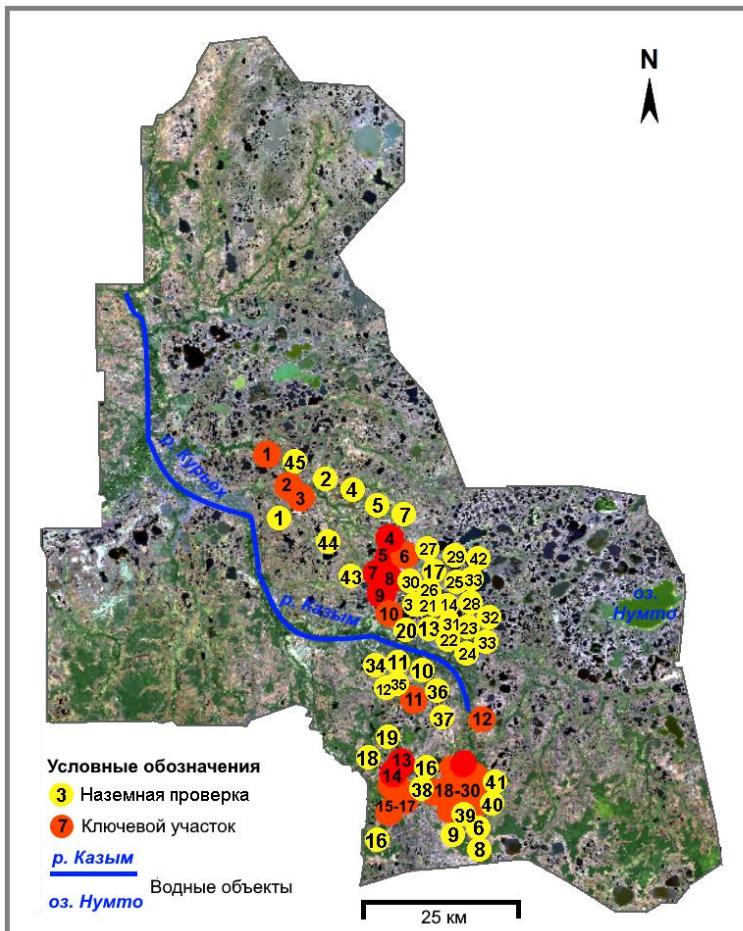


Рис. 1. Размещение ключевых участков детальных почвенных карт и точек полевой верификации (наземной проверки).

Fig. 1. Placement of key areas of detailed soil maps and field verification points (on-ground checks).

В легенде отображены наиболее распространенные таксоны органогенных почв на типовом и подтиповом уровнях, в том числе предложенные нами ранее подтипы влажных регрессивных и сухих регрессивных почв в рамках типа торфяных олиготрофных почв (Шишконакова и др., 2016; Аветов и др., 2022) (табл. 1). Учитывая комплексность болот, большинство единиц картографирования торфяных почв представляют собой почвенные комбинации. Так, в обобщенную единицу легенды объединены комбинации торфяных почв грядово-мочажинных болот с регрессивными явлениями, озерково-грядово-мочажинных болот и аапа болот, участки которых часто составляют единый болотный массив, в котором без детальных наземных обследований невозможно установить пространственную смену мезотрофных, олиготрофных почв и их влажного регрессивного подтипа. В свою очередь, торфяные почвы мерзлых бугров в почвенных сочетаниях плоско- и крупнобугристых комплексных болот показаны на карте по преобладающему компоненту – сухой регрессивной торфяной почве, приуроченной к плоским буграм. Встречающийся спорадически и занимающий незначительные пространства подтип торфяных реликтово-эвтрофных почв крупных бугров выведен за рамки легенды. Среди комбинаций минеральных почв, обусловленных пространственной литологической неоднородностью, выделены мозаики глееземов и подзолов.

Составленная почвенная карта парка “Нумто” (рис. 2) охватывает площадь 6 909.5 км². В таблице 1 также приведены данные, отражающие состав почвенного покрова.

Закономерности строения почвенного покрова парка “Нумто”

Составленная карта позволила выявить ряд закономерностей в строении почвенного покрова парка. Минеральные (постлитогенные) почвы сосредоточены, главным образом, в южной части парка, что связано с относительно меньшей заболоченностью северного макросклона Сибирских увалов.

Таблица 1. Легенда к карте парка “Нумто”
Table 1. Legend to the map of Numto Park

№ на карте	Ландшафты	Почвы	Количество точек обучающей выборки		Площади, занимаемые почвами (по данным цифровой почвенной карты)	
			Обеспеченные разрезами и геоботаническими описаниями	Количество использованных для обучения пикселей	%	га
ЛЕСА						
1	Светлохвойные леса	Подзолы иллювиально-железистые (в том числе глееватые и оторфованные) карманистые и языковатые	11	4 784	11.11	76 764
2	Темнохвойные леса, в том числе с лиственницей (в основном на Сибирских увалах), формируются в условиях повышенного увлажнения под сосново-кедровыми, елово-лиственничными кустарничково-лишайниково-моховыми заболоченными лесами на литологически неоднородных породах	Мозаики таежных глееватых земов оторфованных и подзолов иллювиально-железистых, в том числе глееватых и оторфованных	4	16 599	7.3	50 451

Продолжение таблицы 1

Table 1 continued

№ на карте	Ландшафты	Почвы	Количество точек обучающей выборки		Площади, занимаемые почвами (по данным цифровой почвенной карты)	
			Обеспеченные разрезами и геоботаническими описаниями	Количество использованных для обучения пикселей	%	га
3	Вторичные светлохвойные с участием сосны леса	Подзолы с включением глееземов пирогенные	1	2 840	0.87	6 036
БОЛОТА						
4	Крупнобугристые и плоскобугристые комплексные болота и талые лишайниковые болота	Сочетание торфяных олиготрофных сухих регressiveных, преимущественно маломощных и среднемощных (на буграх), и торфяных олиготрофных, преимущественно среднемощных и мощных (в мочажинах), почв	37	2 565	9.41	65 014

Продолжение таблицы 1

Table 1 continued

№ на карте	Ландшафты	Почвы	Количество точек обучающей выборки		Площади, занимаемые почвами (по данным цифровой почвенной карты)	
			Обеспеченных разрезами и геоботаническими описаниями	Количество использованных для обучения пикселей	%	га
5	Олиготрофные сосново-кустарничково-сфагновые болота (рямы) и грядово-мочажинные комплексные болота	Торфяные олиготрофные, преимущественно маломощные почвы	73	7 116	36.29	250 740
6	Олиготрофные грядово-мочажинные с регрессивными явлениями, грядово-мочажинно-озерковые и аапа болота	Торфяные олиготрофные, преимущественно маломощные и среднемощные почвы с включениями торфяной олиготрофной влажной регрессивной и мезотрофной торфяной почв	27	2 317	7.1	49 068

Продолжение таблицы 1

Table 1 continued

№ на карте	Ландшафты	Почвы	Количество точек обучающей выборки		Площади, занимаемые почвами (по данным цифровой почвенной карты)	
			Обеспеченные разрезами и геоботаническими описаниями	Количество использованных для обучения пикселей	%	га
7	Мезотрофные болота (низкие аллювиальные террасы и притеррасные поймы, крупные ложбины стока, в т.ч. в истоках рек, поймы ручьев и т.д.).	Торфяные мезотрофные, преимущественно среднемощные и мощные почвы	22	1 762	5.92	40 897
8	Согры (эвтрофные и мезо-эвтрофные древесные пойменные болота)	Сочетание торфяных эвтрофных маломощных, среднемощных и мощных (в межгривных понижениях) и эвтрофных торфяно- и торфянисто-глеевых (на гривах) почв	11	—	1.85	12 776

Продолжение таблицы 1

Table 1 continued

№ на карте	Ландшафты	Почвы	Количество точек обучающей выборки		Площади, занимаемые почвами (по данным цифровой почвенной карты)	
			Обеспеченных разрезами и геоботаническими описаниями	Количество использованных для обучения пикселей	%	га
9	Пойма Казыма	Сочетание аллювиальных дерново-глеевых (в том числе оподзоленных), иловато-торфяно- и торфянисто-глеевых (на гривах) и торфяных эвтрофных преимущественно маломощных и среднеподъемных (в межгривных понижениях) почв	5	—	2.37	16 391
10	Хасыреи	Торфяные мезотрофные и эвтрофные слаборазвитые и торфянисто-глеевые почвы	20	—	0.8	5 517

Продолжение таблицы 1

Table 1 continued

№ на карте	Ландшафты	Почвы	Количество точек обучающей выборки		Площади, занимаемые почвами (по данным цифровой почвенной карты)	
			Обеспеченных разрезами и геоботаническими описаниями	Количество использованных для обучения пикселей	%	га
11	НАРУШЕННЫЕ ПЛОЩАДКИ И НАСЫПИ		–	1 074	0.23	1 578
12	ВОДОЕМЫ		–	18 875	16.75	115 718
		Всего:	211	60 772	100	690 950

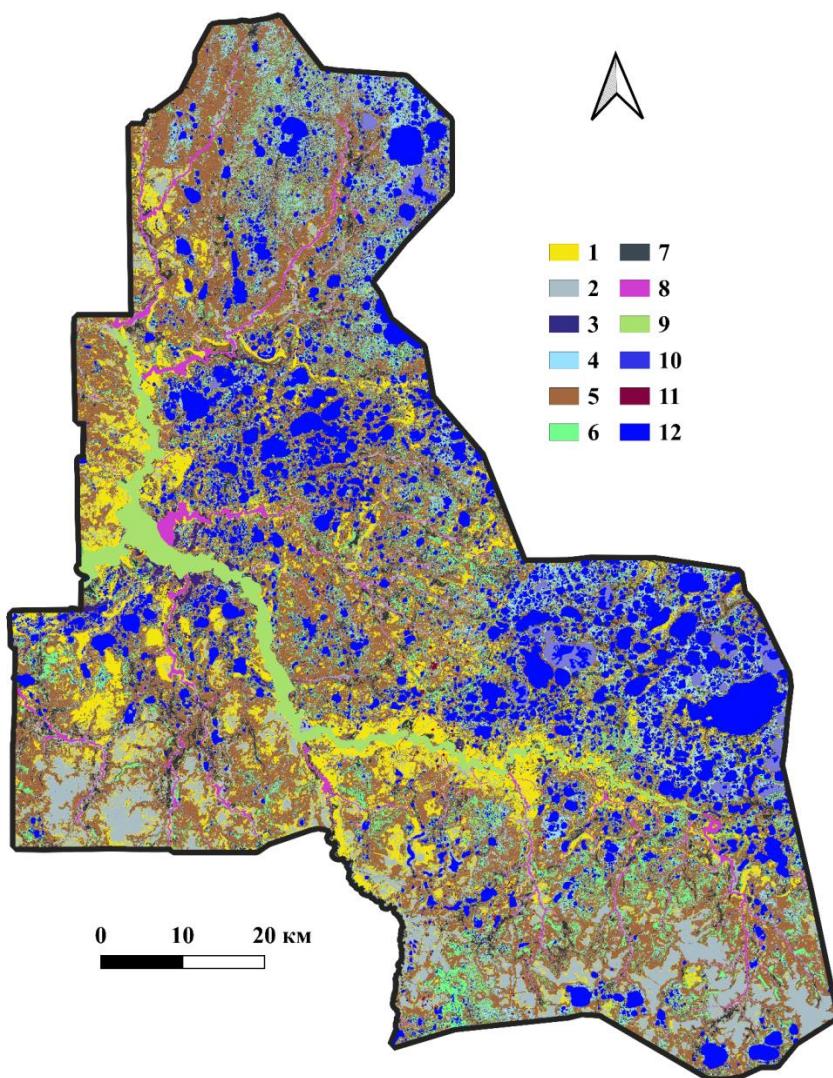


Рис. 2. Цифровая почвенная карта парка “Нумто”. Условные обозначения приведены под соответствующими номерами легенды в табл. 1.

Fig. 2. Digital soil map of Numto Park. Legend is given under the corresponding numbers in Table 1.

Основные массивы глееземов в мозаиках с подзолами приурочены к наиболее расчлененной их части, протягивающейся вдоль главной гряды возвышенности. Гомогенные контуры подзолов, сформированные на песчаных отложениях, в целом преобладают над мозаиками глееземов и подзолов и имеют тенденцию к доминированию на более пологих склонах увалов. Крупные контуры подзолов представлены на террасах субширотной части долины верхнего течения Казыма. Почвенные сочетания плоско- и крупнобугристых болотных комплексов занимают локальные водоразделы и слабодренированные заозеренные территории. Их роль в структуре почвенного покрова особенно усиливается в северной и центральной частях парка. Олиготрофные торфяные почвы являются фоновым компонентом почвенного покрова парка (см. табл. 1). Большие пространства заняты этими почвами в долинах крупных рек, а в южной части парка они распространены на относительно мало дренированных склонах водоразделов. Комплексы олиготрофных торфяных (в т. ч. влажных регressiveных) и мезотрофных торфяных почв отмечаются в довольно разнообразных ландшафтных позициях, в основном в виде вкраплений в массивы торфяных олиготрофных почв. В расчлененной части Сибирских увалов они занимают ложбины стока. Мезотрофные почвы распространены на первых низких террасах долин крупных рек, а также нередки во внутриболотных ложбинах стока мерзлых бугристых комплексных болот. Преобладающие по площади комплексы и сочетания почв хасыреев распространены к северу от долины Казыма.

Проблемы в отображении различных компонентов почвенного покрова на цифровой карте

Обобщая опыт построения и верификации цифровой почвенной карты парка “Нумто”, важно отметить, что достоверность отображения разных почвенных выделов неодинакова. Наибольшие сложности при картографировании вызвали территории комплексных болот и таежно-болотные экотоны.

При анализе контуров мозаик глееземов и подзолов (№ 2 в легенде) обращает на себя внимание высокая степень достоверности их выделения в районе Сибирских увалов. Специфика отобра-

жения на космических снимках этих территорий обусловлена такими характеристиками древостоя, как более высокие для района исследований показатели бонитета и сомкнутости крон, разнообразие породного состава (сосна, кедр, лиственница, береза, осина, ель), что, в свою очередь, определяется распространением здесь, в том числе, и суглинистых почвообразующих пород. Помимо основной гряды Сибирских увалов, мозаиками глееземов и подзолов также заняты разрозненные минеральные гривы, встречающиеся севернее увалов и также отличающиеся сравнительно высоким бонитетом и сомкнутостью древостоя произрастающих на них лесов.

К проблемным контурам, нередко отображающимся как мозаики глееземов с подзолами, могут относиться участки торфяных, торфяно- и торфянисто-глеевых эвтрофных почв в сограх пониженнной равнинной части парка. “Шум”, создаваемый одиночными пикселями, характерными для мозаик глееземов и подзолов, также проявляется внутри ареалов, где обычно преобладают мезотрофные торфяные почвы под травяными березняками (из березы белой), расположенными на приозерных террасах или на отдельных внутриболотных грядах. На самом севере парка “шум” пикселей, отображающих мозаики глееземов и подзолов, возникает на мерзлых буграх (см. табл. 2, пример 4), имеющих своеобразные характеристики: в составе покрывающей их растительности преобладают кустарничково-зеленомошные группировки с возможным вкраплением облесенных участков, чередующиеся с мелкими термокарстовыми озерками. Бугры такого типа в южной и центральных частях парка отсутствуют, на участках мерзлых бугров этих территорий пиксели мозаик глееземов и подзолов встречаются редко и единично.

Контуры с подзолами (№ 1 в легенде) отображаются на карте в общем удовлетворительно. При этом худшие результаты отмечены для слабо облесенных сосновых грив (с лесами паркового типа). На таких участках пиксели подзолов могут подменяться пикселями, соответствующими по спектральным характеристикам почвам плоскобугристых комплексных болот. Появление пикселей, характерных для подзолов, заметно также на механически нарушенных участках (зимники, геофизические просеки и др.),

насыпях, на песчаных отмелях крупных озер. В то же время участки с глееватыми подзолами – низкие минеральные гривы с сосняками-зеленомошниками, экотоны грив – нередко отображаются как торфяные олиготрофные почвы, характерные для рямов и других олиготрофных болот с неглубокой торфянной залежью.

Хорошо выделились торфяные олиготрофные, преимущественно маломощные почвы (№ 5 легенды). Подавляющая часть ареалов этих почв приурочена к рямам (сосредоточенным вокруг минеральных островов и на террасах рек) и грядово-мелко- и среднемочажинным болотам. В качестве примеси они присутствуют по периферии ложбин стока с доминированием мезотрофных почв. В отдельных случаях они отображались как олиготрофные почвы плоскобугристых болот.

Пониженная достоверность получена для почвенных выделов, занятых мерзлыми плоскобугристыми болотами (№ 4 легенды). Сложность выделения этих ареалов обусловлена комплексностью почвенного покрова данного ландшафта, определяемого размерами бугров, мочажин, их соотношением, наличием термокарстовых или регрессивных озерков, а также проточностью ерсей-мочажин. Такое значительное число факторов приводит к возникновению комбинаций из пикселей, чаще всего имеющих вид мозаичного рисунка, особого в каждом конкретном случае (табл. 2). В ряде ситуаций часть ареалов почвенных комбинаций плоскобугристых комплексов замещается на гомогенные контуры торфяных олиготрофных почв, характерных для рямов и грядово-мочажинных болот, а также почв, распространенных на комплексных болотах с проявлениями регресса и наличием мезотрофных почв (табл. 2, пример 3). Хорошо выявляются, в соответствии с разработанной легендой, почвенные выделы (почвенные сочетания) комплексных плоскобугристых болот с заметным доминированием доли бугров (занимающих более 70% пикселя). Присутствие озерков может осложнять распознавание почв, так как в этом случае проявляется сходство с почвами регрессивных талых болот, также имеющих внутриболотные озерки.

Таблица 2. Примеры мозаичного рисунка из пикселей, возникших при создании карты на участках плоскобугристых болот (рис. 1–4)

Table 2. Examples of pixel mosaic patterns created during the mapping in areas of flat mound bogs (Fig. 1–4)

	1. Болотный комплекс с выраженным преобладанием плоских бугров (бугры занимают 70–80%) с лишайниковым покровом, примесь пикселей типа “подзол” свойственна для участков с лишайниками.
	2. Болотный комплекс с сочетанием бугров (бугры занимают до 40–50%), мочажин и крупных озерков. В талых понижениях появляется сочетание пикселей, характерных для олиготрофных торфяных почв (необводненные мочажины) и участков с почвами, характерными для регressive мочажин с озерками.
	3. Комплекс плоско- и крупнобугристого болота с проточной мочажиной по ложбине стока (для нее свойственна примесь пикселей мезотрофных почв).
	4. Типичный мозаичный рисунок, характерный для массивов плоскобугристых болот на северо-востоке парка (бугры занимают менее 40% площади). Отличается пестротой, проявляющейся в сочетании пикселей разнообразных болот.

Кроме того, в ареалы мерзлых бугров на цифровой карте не-редко оказываются включенными маломощные торфяные и торфяно-глеевые почвы лишайниковых слабо облесенных талых болот, имеющие определенное распространение на территории парка (Веревкина, Лапшина, 2018).

На юге парка мерзлые бугры могут присутствовать в виде отдельных вкраплений в составе комплексных олиготрофных грядово-мочажинных болот (ГМК). В этом случае на карте они включаются в гомогенные ареалы олиготрофных торфяных почв. Следует отметить, что выбранный масштаб и методика картографирования не позволяют интерпретировать явления деградации мерзлых бугров, происходящие в условиях глобального изменения климата на крайней южной границе криолитозоны Западной Сибири, к которой как раз и относится территория парка “Нумто” (Губарьков, Московченко, 2023).

Также сложной задачей представляется отображение почв болотных комплексов олиготрофных торфяных (в том числе влажных регрессивных) и мезотрофных торфяных почв (№ 6 легенды). Возможно, что для более полного выявления регресса необходимо учитывать разновременные снимки (в первую очередь летних месяцев и лет с более сильным обводнением болот). Определенное значение имеет ориентированность гряд: так неориентированные перпендикулярно стоку гряды на отдельных массивах были показаны как участки с почвами мерзлых бугров, а ориентированные – как почвы грядово-мочажинных комплексных болот с проявлениями регресса. Почвы регрессивных болотных комплексов (№ 6 легенды) могут отображаться на месте сухих регрессивных почв бугристых торфяников. Обычно это происходит на болотах с мелкоконтурностью бугров (размерами до одного пикселя).

К наиболее достоверно выделяемым относятся крупные ареалы мезотрофных почв (№ 7 легенды). Хорошо отображаются занятые ими ложбины стока, участки в долинах рек, проточные ерсеи, широкие термокарстовые просадки. Неопределенности в этом случае могут создавать мелкоконтурность и наличие экотонов.

Верификация цифровой карты

1) *Оценка точности в плагине SCP с созданием случайных стратифицированных точек (stratified random points).* Для почвенных макроклассов максимальная точность производителя составляла 89% в случае торфяных олиготрофных регрессивных почв грядово-мочажинных комплексов (№ 6 в легенде), минимальная – 41% для торфяных олиготрофных почв мерзлых бугров (№ 4 в легенде). Точность пользователя принимала максимальное значение в 79% для класса мезотрофных почв (№ 7 в легенде), минимальное – 58% для мозаики глееземов и подзолов (№ 2 в легенде) (табл. 3). Средняя общая точность карты составила 76.1%. Полученное значение является положительным результатом для метода Random Forest с учетом неоднородности почвенного покрова и сложности его дешифрирования по фитоиндикационным признакам и сопоставимо с результатами, приведенными для построенной с использованием нейросетей цифровой карты экосистем парка “Нумто” (Московченко, 2024).

2) *Оценка точности цифровой почвенной карты проводилась с использованием детальных почвенных карт.* Всего площадь исследуемой территории составила 6 909.5 км², площадь ключевых участков – 6.52 км². Для оценки точности рассчитывалась общая точность картографирования: отношение общего числа пикселей с совпавшими почвами к общему числу пикселей ключевого участка (Congalton, 1991). По результатам расчетов средняя общая точность для всех участков составила 75%, медианная точность – 78%, максимальная точность – 95% и минимальная точность – 34% (табл. 4). Среднее линейное отклонение составило 11%, стандартное отклонение – 14%.

3) *Оценка точности построенной карты с использованием полевой верификации.* Наибольшее количество точек соответствовало торфяным олиготрофным почвам талых биогеоценозов (комплексных грядово-мочажинных и сосново-кустарничково-сфагновых болот), что отражает их распространение на территории парка. По результатам проведенной экспертной оценки точность цифровой карты составила 78.4%.

Таблица 3. Результаты оценки точности цифровой карты в плагине SCP

Table 3. Results of digital map accuracy evaluation in SCP plugin

Почвы (перечень приводится в сокращенном варианте, полный вариант приведен в таблице 1)	Точность пользователя, %	Точность производителя, %
Подзолы иллювиально-железистые (в том числе глееватые и оторфованные) карманистые и языковатые	77	79
Мозаики таежных глееземов оторфованных и подзолов иллювиально-железистых, в том числе глееватых и оторфованных	58	82
Подзолы с включением глееземов пирогенные	67	100
Сочетание торфяных олиготрофных сухих регрессивных, преимущественно маломощных и среднемощных (на буграх), и торфяных олиготрофных, преимущественно среднемощных и мощных (в мочажинах), почв	63	41
Торфяные олиготрофные преимущественно маломощные почвы	78	73
Торфяные олиготрофные, преимущественно маломощные и среднемощные почвы с включениями торфяной олиготрофной влажной регрессивной и мезотрофной торфяной почв	52	89
Торфяные мезотрофные, преимущественно среднемощные и мощные почвы	79	71

Продолжение таблицы 1

Table 1 continued

Почвы (перечень приводится в сокращенном варианте, полный вариант приведен в таблице 1)	Точность пользователя, %	Точность производителя, %
Сочетание торфяных эвтрофных маломощных, среднемощных и мощных (в межгривных понижениях) и эвтрофных торфяно- и торфянисто-глеевых (на гравах) почв	85	77
Сочетание аллювиальных дерново-глеевых (в том числе оподзоленных), иловато-торфяно- и торфянисто-глеевых (на гравах) и торфяных эвтрофных, преимущественно маломощных и среднемощных (в межгривных понижениях), почв	95	95
Торфяные мезотрофные и эвтрофные слаборазвитые и торфянисто-глеевые почвы	100	78
Песчаные насыпи и дороги	88	94
Водоемы	86	96

Таблица 4. Результаты оценки точности на ключевых участках на основе сопоставления цифровой почвенной карты и детальных почвенных карт микроключей бассейна Казыма, построенных традиционным методом полевой съемки

Table 4. Results of accuracy assessment in key areas based on comparison of digital soil map and detailed soil maps of microkeys of the Kazym basin compiled by traditional field survey method

Ключевой участок	Почвы (обозначения соответствуют номерам легенды, см. табл.1)	Количество пикселей, в которых почвы совпали	Количество пикселей на участке (всего)	Общая точность, %
1	1, 5	107	137	78
2	1, 4, 5, 6	152	211	72
3	1, 5	104	129	81
4	3, 5, 6	83	136	61
5	1, 5, 6	193	247	78
6	1, 5, 7	109	153	71
7	1, 5, 6	68	134	51
8	5, 6	157	169	93
9	1, 5, 6, 12	113	182	62
10	1, 5, 6, 12	52	77	66
11	1, 5, 4, 12	106	126	84
12	1, 5	32	58	55
13	4, 5, 6, 7, 12	108	133	88
14	5, 7, 12	72	88	82
15	2, 5	136	153	89
16	5, 7, 12	19	59	34
17	2, 5, 7	111	140	69
18	6	80	93	86
19	1, 5	29	42	69
20	1, 5	126	197	64
21	2, 5, 7	34	48	71
22	4, 5, 6	96	103	95
23	4, 7	89	103	86
24	5, 4	99	112	88
25	2, 5	46	58	79
26	5, 6	62	75	72
27	4	78	86	85
28	4	128	197	65
29	5	51	61	84
30	5, 7	136	146	93

Наименее достоверно оказались отображены ареалы почв плоскобугристых комплексов. Максимальная точность отображения была обнаружена для ареалов подзолов, полностью подтвержденных при полевой верификации.

ВЫВОДЫ

Верификация цифровой почвенной карты “Нумто” и сопредельных территорий различными методами показала достаточно высокую ее общую точность, составившую от 75.0% до 78.4%.

Информативность почвенной карты была повышена за счет включения в состав легенды среднемасштабной карты таких единиц картографирования как мезотрофные почвы, почвы влажных регрессивных болот, почвы хасырейных комплексов.

По данным цифровой карты наибольшее распространение на территории парка получили талые олиготрофные торфяные почвы (43.5%); подзолы (13.34%); сочетания олиготрофных торфяных почв плоскобугристых и крупнобугристых комплексных болот (11.3%); комплексы олиготрофных торфяных (в том числе влажных регрессивных) и мезотрофных торфяных почв (8.3%) и мезотрофные почвы (7.1%).

Наибольшую сложность вызывает почвенное картографирование комплексных болот и лесоболотных экотонов. В особенности это касается отображения почв мелкоизогнутых плоскобугристых торфяников, чередующихся с талыми комплексными болотами с доминированием лишайников на повышенных элементах болотного рельефа.

Примененный в настоящей работе подход может быть использован при картографировании обширных территорий северной тайги и лесотундры Западно-Сибирской низменности на основе спутниковых данных Landsat-8 с учетом существующего в настоящее время дефицита почвенно-картографических материалов для этого региона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аветов Н.А., Трофимов С.Я. Почвенный покров таежных и пойменных ландшафтов бассейна р. Пякупур Западной Сибири // Почвоведение. 1997. № 1. С. 31–35.

2. Аветов Н.А., ШишкинаКова Е.А., Кинжаев Р.Р., Арзамазова А.В. Структура почвенного покрова заболоченной равнины северо-таежной подзоны Западной Сибири (бассейн р. Казым) // Почвоведение. 2022. № 2. С. 208–218. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0032180X22020046>.
3. Ахметова Г.В., Токарев П.Н. Использование ГИС-технологий для идентификации болотных почв при обновлении электронной почвенной карты Карелии // ИнтерКарто. ИнтерГИС. 2020. Т. 26. № 2. С. 66–78. DOI: <https://doi.org/10.35595/2414-9179-2020-2-26-66-78>.
4. Валеева Э.И., Московченко Д.В., Арефьев С.П. Природный комплекс парка “Нумто”. Новосибирск: Институт проблем освоения Севера СО РАН, 2008. 280 с.
5. Векшина В.Н. Построение цифровых моделей почвенного покрова западной части Большеземельской тундры // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2019. Вып. 99. С. 21–46. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2019-99-21-46>.
6. Веревкина Е.Л., Лапшина Е.Д. Мир болот природного парка “Нумто”. Характеристика, типология и значение для устойчивого развития. Екатеринбург: “Ассорти”, 2019. 50 с.
7. Гаджиев И.М., Овчинников С.М. Почвы средней тайги Западной Сибири. Новосибирск: Наука, 1977. 152 с.
8. Горячkin С.В. Почвенный покров Севера (структура, генезис, экология, эволюция). М.: ГЕОС, 2010. 414 с.
9. Грибов С.И., Гаськов С.И., Опрышко Н.Ф. Структуры почвенного покрова земельных угодий Ханты-Мансийского автономного округа // Вестник Алтайского гос. аграрного ун-та. 2004. № 4. С. 36–40.
10. Добровольский Г.В., Никитин Е.Д., Афанасьева Т.В. Таежное почвообразование в континентальных условиях. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1981. 216 с.
11. Долгова Л.С., Гавrilova И.П. Особенности почв средне-и северотаежных подзон Западной Сибири (в пределах Тюменской области) // Природные условия Западной Сибири. 1971. Вып. 1. С. 77–90.
12. Евдокимова Т.И. Почвенная съемка. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1987. 269 с.
13. Караваева Н.А. Почвы тайги Западной Сибири. М.: Наука, 1973. 167 с.
14. Каверин Д.А., Шахтарова О.В., Пастухов А.В., Мажитова Г.Г., Лаптева Е.М. Составление крупномасштабных почвенных карт ключевых участков в тундре и лесотундре северо-востока Европейской России // География и природные ресурсы. 2012. № 3. С. 140–146.
15. Ковалев Р.В., Волковинцер В.И., Гаджиев И.М., Корсунов В.М., Курачев В.М., Хмелев В.А. Основные черты почвообразования и

- особенности почв Западно-Сибирской равнины и ее горного юго-восточного окаймления // Доклады сибирских почвоведов к X Международному конгрессу почвоведов. Новосибирск: Наука, 1974. С. 36–53.
16. Коркина Е.А., Стреляева А.С., Нестерова К.В. Геоинформационный анализ почвенного покрова Среднего Приобья // География и геоэкология на службе науки и инновационного образования. Мат-лы международной науч.-практич. конф., посвященной Всемирному Дню Земли и 100-летию заповедной системы России. Красноярск, 2016. С. 71–74.
17. Московченко Д.В., Губарьков А.А. Температурные режимы почв на южной границе зоны мерзлых болот в Западной Сибири // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2023. Вып. 117. С. 23–51. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2023-117-23-51>.
18. Московченко Д.В., Козин В.В. Ландшафтно-экологическое картографирование территории природного парка “Нумто” (ХМАО-Югра) // Ландшафтovedение: теория, методы, ландшафтно-экологическое обеспечение природопользования и устойчивого развития. Материалы XII Международной ландшафтной конференции. Т. 1. Тюмень: Тюменский гос. университет. 2017. С. 220–222.
19. Московченко М.Д. Применение методов машинного обучения для картографирования типов болот на территории природного парка “Нумто” (Западная Сибирь) // Растительность болот: современные проблемы классификации, картографирования, использования и охраны. Материалы V международного научного семинара. Минск: ИВЦ Минфина, 2024. С. 110–116.
20. Смоленцев Б.А. Структура почвенного покрова Сибирских Увалов (северотаежная подзона Западной Сибири). Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. 118 с.
21. Терентьева И.Е., Филиппов И.В., Сабреков А.Ф., Глаголев М.В., Курбатова Ю.А., Максютов Ш. Картографирование таежных болот Западной Сибири на основе дистанционной информации // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2020. Т. 84. № 6. С. 920–930. DOI: <https://doi.org/10.31857/S2587556620060102>.
22. Терещенков О.М., Кутыев Х.А., Попов Е.Н. Почвенно-экологические карты нефтедобывающих регионов Западной Сибири и методы их составления // Современные проблемы географии и картографии почв. Материалы (тезисы) Всесоюзной конф. М.: ВАСХНИЛ, 1992. С. 67–68.
23. Уфимцева К.А. Почвы южной части таежной зоны Западно-Сибирской равнины. М.: Колос, 1974. 206 с.
24. Фирсова В.П. Почвы таежной зоны Урала и Зауралья. М.: Наука,

1977. 176 с.

25. Фриланд В.М. Структура почвенного покрова мира. М.: Мысль, 1984. 235 с.

26. Шишкина Е.А., Аветов Н.А., Ананко Т.В., Герасимова М.И., Савицкая Н.В. Болотные торфяные почвы таежной и подтаежной зон Западной Сибири на цифровой модели почвенной карты России масштаба 1 : 2 500 000 в формате классификации почв России // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2020. Вып. 104. С. 223–240. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-104-223-240>.

27. Шишкина Е.А., Аветов Н.А., Толпышева Т.Ю. Торфяные почвы бореальных регрессивных болот Западной Сибири: проблемы биологической диагностики и систематики // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2016. Вып. 84. С. 61–74. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2016-84-61-74>.

28. Belgiu M., Lucian D. Random forest in remote sensing: A review of applications and future directions // ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing. 2016. Vol. 114. P. 24–31. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.01.011>.

29. Congalton R.G. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data // Remote sensing of environment. 1991. Vol. 37. No. 1. P. 35–46.

30. Olofsson P., Foody G.M., Herold M., Stehman S.V., Woodcock C.E., Wulder M.A. Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change // Remote sensing of Environment. 2014. Vol. 148. P. 42–57. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.015>.

31. Heung B., Hung Chak Ho, Zhang J., Knudby A., Bulmer C.E., Schmidt M.G. An overview and comparison of machine-learning techniques for classification purposes in digital soil mapping // Geoderma. 2016. Vol. 265. P. 62–77. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.11.014>.

32. Wadoux A.M.J.-C., Minasny B., McBratney A.B. Machine learning for digital soil mapping: Applications, challenges and suggested solutions // Earth-Science Reviews. 2020. Vol. 210. 103359. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103359>.

33. van der Westhuizen S., Heuvelink G.B.M., Hofmeyr D.P. Multivariate random forest for digital soil mapping // Geoderma. 2023. Vol. 431. 116365. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116365>.

REFERENCES

1. Avetov N.A., Trofimov S.Ya., Pochvennyi pokrov taezhnykh i poimennykh landshaftov basseina r. Pyakupur Zapadnoi Sibiri (Soil cover of

- taiga and floodplain landscapes of the Pyakupur River basin in Western Siberia), *Pochvovedenie*, 1997, No.1, pp. 31–35.
2. Avetov N.A., Shishkonakova E.A., Kinzhaev R.R., Arzamazova A.V., Struktura pochvennogo pokrova zabolochennoi ravniny severo-taezhnoi podzony Zapadnoi Sibiri (bassein r. Kazym) (The structure of the soil cover of the boggy plain of the northern taiga subzone of Western Siberia (Kazym River basin)), *Pochvovedenie*, 2022, No. 2, pp. 208–218, DOI: <https://doi.org/10.31857/S0032180X22020046>.
3. Akhmetova G.V., Tokarev P.N., Ispol'zovanie GIS-tehnologii dlya identifikatsii bolotnykh pochv pri obnovlenii elektronnoi pochvennoi karty Karelii (Using GIS technologies to identify mire soils in updating the electronic soil map of Karelia), *InterKarto. InterGIS*, 2020, Vol. 26, No. 2, pp. 66–78. DOI: <https://doi.org/10.35595/2414-9179-2020-2-26-66-78>.
4. Valeeva E.I., Moskovchenko D.V., Aref'ev S.P., *Prirodnyi kompleks parka "Numto"* (Nature complex of the park "Numto"), Novosibirsk: Institut problem osvoeniya Severa SO RAN, 2008, 280 p.
5. Vekshina V.N., The development of digital models of the soil cover in the western part of Bol'shezemel'skaya tundra, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2019, No. 99, pp. 21–46, DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2019-99-21-46>.
6. Verevkina E.L., Lapshina E.D., *Mir bolot prirodnogo parka "Numto". Kharakteristika, tipologiya i znachenie dlya ustoichivogo razvitiya* (The World of wetlands in the Numto Nature Park. Characteristics, typology and significance for sustainable development), Ekaterinburg: "Assorti", 2019, 50 p.
7. Gadzhiev I.M., Ovchinnikov S.M., *Pochvy srednei taigi Zapadnoi Sibiri* (Soils of the middle taiga of Western Siberia), Novosibirsk: Nauka, 1977, 152 p.
8. Goryachkin S.V., *Pochvennyi pokrov Severa (struktura, genezis, ekologiya, evolyutsiya)* (Soil cover of the North (structure, genesis, ecology, evolution)), Moscow: GEOS, 2010, 414 p.
9. Gribov S.I., Gas'kov S.I., Opryshko N.F., *Struktury pochvennogo pokrova zemel'nykh ugodii Khanty-Mansiiskogo avtonomnogo okruga* (Soil cover structures of lands of the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug), *Vestnik Altaiskogo gos. agrarnogo un-ta*, 2004, No. 4, pp. 36–40.
10. Dobrovolskii G.V., Nikitin E.D., Afanas'eva T.V., *Taezhnoe pochvoobrazovanie v kontinental'nykh usloviyakh* (Taiga soil formation in continental conditions), Moscow: Izd-vo Mosk. un-ta, 1981, 216 p.
11. Dolgova L.S., Gavrilova I.P., Osobennosti pochv sredne-i severotaezhnykh podzon Zapadnoi Sibiri (v predelakh Tyumenskoi oblasti) (Peculiarities of soils of the middle and northern taiga subzones of Western Siberia (within the Tyumen region)), In: *Prirodnye usloviya Zapadnoi Sibiri* (Natural conditions

- of Western Siberia), Moscow: Izd-vo Mosk. un-ta, 1971, Vol. 1, pp. 77–90.
12. Evdokimova T.I., *Pochvennaya s'emka* (Soil survey), Moscow: Izd-vo MGU, 1987, 269 p.
13. Karavaeva N.A., *Pochvy taigi Zapadnoi Sibiri* (Soils of the taiga of Western Siberia), Moscow: Nauka, 1973, 167 p.
14. Kaverin D.A., Shakhtarova O.V., Pastukhov A.V., Mazhitova G.G., Lapteva E.M., Sostavlenie krupnomasshtabnykh pochvенных карт klyuchevых участков в тундре и лесотундре северо-востока Европейской России (Compilation of large-scale soil maps of key areas in the tundra and forest-tundra of northeastern European Russia), *Geografiya i prirodnye resursy*, 2012, No. 3, pp. 140–146.
15. Kovalev R.V., Volkovintser V.I., Gadzhiev I.M., Korsunov V.M., Kurachev V.M., Khmelev V.A., Osnovnye cherty pochvoobrazovaniya i osobennosti pochv Zapadno-Sibirskoi ravniny i ee gornogo yugo-vostochnogo okaimleniya (The main features of soil formation and soil characteristics of the West Siberian Plain and its mountainous southeastern border), In: *Doklady sibirskikh pochvovedov k X Mezhdunarodnomu kongressu pochvovedov* (Reports of Siberian soil scientists to the 10th International Congress of Soil Scientists), Novosibirsk: Nauka, 1974, pp. 36–53.
16. Korkina E.A., Strelyaeva A.S., Nesterova K.V., Geoinformatsionnyi analiz pochvennogo pokrova Srednego Priob'ya (Geoinformation analysis of the soil cover of the Middle Ob region), *Geografiya i geoekologiya na sluzhbe nauki i innovatsionnogo obrazovaniya* (Geography and Geoecology in the Service of Science and Innovative Education), Proc. International Scientific and Practical Conference Dedicated to the World Earth Day and the 100th Anniversary of the Russian Nature Reserve System, Krasnoyarsk, 2016, pp. 71–74.
17. Moskovchenko D.V., Gubarkov A.A. Soil temperature regimes on the southern border of the zone of frozen bogs in Western Siberia, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2023, No. 117, pp. 23–51, DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2023-117-23-51>.
18. Moskovchenko D.V., Kozin V.V., Landshaftno-ekologicheskoe kartografirovaniye territorii prirodnogo parka "Numto" (KhMAO-Yugra) (Landscape-ecological mapping of the territory of the Natur Park "Numto" (Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug-Yugra)), In: *Landshaftovedenie: teoriya, metody, landshaftno-ekologicheskoe obespechenie prirodopol'zovaniya i ustoichivogo razvitiya* (Landscape science: theory, methods, landscape-ecological support for nature management and sustainable development), Proc. XIIth International Landscape Conference, Tyumen': Tyumenskii gos. universitet, 2017, Vol. 1, pp. 220–222.
19. Moskovchenko M.D., Primenenie metodov mashinnogo obucheniya dlya kartografirovaniya tipov bolot na territorii prirodnogo parka "Numt"

- (*Zapadnaya Sibir'*) (Application of Machine Learning Methods for Mapping Wetland Types in the Numto Nature Park (Western Siberia)), In: *Rastitel'nost' bolot: sovremennye problemy klassifikatsii, kartografirovaniya, ispol'zovaniya i okhrany* (Vegetation of mires: modern problems of classification, mapping, use and protection), Proc. 5th International scientific seminar, Minsk: IVTs Minfina, 2024, pp. 110–116.
20. Smolentsev B.A., *Struktura pochvennogo pokrova Sibirsikh Uvalov (severotaezhnaya podzona Zapadnoi Sibiri)* (Soil cover structure of the Siberian Ridges (northern taiga subzone of Western Siberia)), Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2002, 118 p.
21. Terent'eva I.E., Filippov I.V., Sabrekov A.F., Glagolev M.V., Kurbatova Yu.A., Maksyutov Sh., Kartografirovanie taezhnykh bolot Zapadnoi Sibiri na osnove distantsionnoi informatsii (Mapping of taiga mires of Western Siberia based on remote sensing information), *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Seriya geograficheskaya*, 2020, Vol. 84, No. 6, pp. 920–930, DOI: <https://doi.org/10.31857/S258755620060102>.
22. Tereshchenkov O.M., Kutyev Kh.A., Popov E.N., Pochvenno-ekologicheskie karty neftedobyyayushchikh regionov Zapadnoi Sibiri i metody ikh sostavleniya (Soil-ecological maps of oil-producing regions of Western Siberia and methods of their compilation), In: *Sovremennye problemy geografii i kartografii pochv* (Modern Problems of Soil Geography and Cartography), Proc. All-Union Conference, Moscow: VASKhNIL, 1992, pp. 67–68.
23. Ufimtseva K.A., *Pochvy yuzhnoi chasti taezhnoi zony Zapadno-Sibirskoi ravniny* (Soils of the southern part of the taiga zone of the West Siberian Plain), Moscow: Kolos, 1974, 206 p.
24. Firsova V.P., *Pochvy taezhnoi zony Urala i Zaural'ya* (Soils of the taiga zone of the Urals and Trans-Urals), Moscow: Nauka, 1977, 176 p.
25. Fridland V.M. *Struktura pochvennogo pokrova mira* (Soil cover structure of the world), Moscow: Mysl', 1984, 235 p.
26. Shishkonakova E.A., Avetov N.A., Ananko T.V., Gerasimova M.I., Savitskaya N.V., Mire peat soils of the taiga and sub-taiga zones of West Siberia on a digital model of the soil map of Russia at a scale of 1 : 2 500 000 in terms of the Russian soil classification, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2020, No. 104, pp. 223–240, DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-104-223-240>.
27. Shishkonakova E.A., Avetov N.A., Tolpysheva T.Yu., Peat soils of boreal regressive bogs in West Siberia: Problems of biological diagnostics and systematics, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2016, No. 84, pp. 61–74, DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2016-84-61-74>.
28. Belgiu M., Lucian D., Random forest in remote sensing: A review of

- applications and future directions, *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 2016, Vol. 114, pp. 24–31, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.01.011>.
29. Congalton R.G., A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data, *Remote sensing of environment*, 1991, Vol. 37, No. 1, pp. 35–46.
30. Heung B., Hung Chak Ho, Zhang J., Knudby A., Bulmer C.E., Schmidt M.G., An overview and comparison of machine-learning techniques for classification purposes in digital soil mapping, *Geoderma*, 2016, Vol. 265, pp. 62–77, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.11.014>.
31. Olofsson P., Foody G.M., Herold M., Stehman S.V., Woodcock C.E., Wulder M.A. Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change, *Remote sensing of environment*, 2014, Vol. 148, pp. 42–57, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.015>.
32. Wadoux A.M.J.-C., Minasny B., McBratney A.B., Machine learning for digital soil mapping: Applications, challenges and suggested solutions, *Earth-Science Reviews*, Vol. 210, 2020, 103359, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103359>.
33. van der Westhuizen S., Heuvelink G.B.M., Hofmeyr D.P., Multivariate random forest for digital soil mapping, *Geoderma*, 2023, Vol. 431, 116365, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116365>.



Ссылки для цитирования:

Прокашев А.М., Матушкин А.С. Серые почвы со вторым гумусовым горизонтом в смешанных лесах Вятского Прикамья // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2025. Вып. 125. С. 42-77.
DOI: 10.19047/0136-1694-2025-125-42-77

Cite this article as:

Prokashev A.M., Matushkin A.S., Gray soils with a second humus horizon in the mixed forests of the Vyatka-Kama region, Dokuchaev Soil Bulletin, 2025, V. 125, pp. 42-77, DOI: 10.19047/0136-1694-2025-125-42-77

Серые почвы со вторым гумусовым горизонтом в смешанных лесах Вятского Прикамья

© 2025 г. А. М. Прокашев^{1,2*}, А. С. Матушкин¹

¹Вятский государственный университет, Россия,
610000, Киров, Московская ул., 36,

*<https://orcid.org/0000-0002-3029-8093>, e-mail: amprokashev@gmail.com.

²Вятский государственный агротехнологический университет, Россия,
610017, Киров, Октябрьский проспект, 133.

Поступила в редакцию 16.05.2025, после доработки 16.06.2025,
принята к публикации 16.09.2025

Резюме: Представлены результаты изучения проблемы генезиса серых почв со вторым гумусовым горизонтом (ВГГ) широколиственно-хвойных лесов востока Русской равнины на территории нижнего правобережья реки Вятка, в пределах Уржумского и Мари-Турецкого плато. ВГГ или AEI[hh] залегают на глубинах около 25–50 см от поверхности и сильно отличаются от вышележащих гумусовых горизонтов по ряду внешних и внутренних свойств, свидетельствующих о сложной истории развития почв с бинарным гумусовым профилем. Работа базируется на комплексе методов морфологического-генетических и аналитических палеопочвенных исследований. Впервые для региона получены данные о морфологии, консервативных и актуальных субстантивных свойствах, генезисе и основных этапах эволюции почв с проблематичным строением профиля. Обоснованы полигенетичная природа почв и реликтовый (остаточный по происхождению) возраст гумуса ВГГ с ранне-среднеголоценовым временем формирования –

около 8.5–6.5 тыс. лет назад или 5.5–4.5 тыс. лет до н. э. – под растительностью, более соответствующей лесостепным палеоландшафтам. Выделены две стадии развития почв: развивающая эволюция с элементами наследующей в бореально-атлантический оптимум; наследующая эволюция с элементами стирающей во вторую половину голоценена. Сделаны выводы о несоответствии данных почв современным биоклиматическим условиям смешанных лесов Вятского Прикамья, деградационном тренде их развития во второй половине голоценена и перспективах дальнейшей трансформации в дерново-подзолистые почвы с ВГГ. Настоящие объекты рассматриваются в качестве раритетного почвенного наследия, соответствующего статусу редких и исчезающих почв, рекомендемых для включения в состав сети охраняемых природных территорий вятской земли.

Ключевые слова: лювисоли; морфология; минеральная часть; органическая часть; возраст; генезис; эволюция.

Gray soils with a second humus horizon in the mixed forests of the Vyatka-Kama region

© 2025 A. M. Prokashev^{1,2*}, A. S. Matushkin¹

¹Vyatka State University,

36 Moscovskaya Str., Kirov 610000, Russian Federation,

*<https://orcid.org/0000-0002-3029-8093>, e-mail: amprokashev@gmail.com.

²Vyatka State Agrotechnological University, , Russia ,

133 Oktyabrskiy prospect, Kirov 610017, Russian Federation.

Received 16.05.2025, Revised 16.06.2025, Accepted 16.09.2025

Abstract: The article presents the results of studying the problem of the genesis of gray soils with the second humus horizon (SHH) of broad-leaved and coniferous forests of the east of the Russian Plain on the territory of the lower right bank of the Vyatka River, within the Urzhumsky and Mari-Tureksky plateaus. The AEI[hh] horizon is located at a depth of about 25–50 cm from the surface and differs significantly from the above-lying humus horizons in terms of its external and internal properties, which indicate a complex history of soil development with a binary humus profile. The work is based on a set of methods of morphological, genetic and analytical paleosurface studies. For the first time, data on the morphology, conservative and relevant substantive properties, genesis and main stages of evolution of soils with problematic profile structure have been obtained for the region. The polygenetic nature of the soils and the relict (residual in origin) age of the

humus of the SHH with the Early Holocene, Atlantic formation time – about 8.5–6.5 thousand years ago – under vegetation more corresponding to the forest-steppe paleolandscapes are substantiated. Two different stages of soil development are distinguished: developing evolution with elements inheriting in the Boreal-Atlantic optimum; inheriting evolution with elements erasing in the second half of the Postglacial. Conclusions are drawn about the inconsistency of these soils with the modern bioclimatic conditions of the mixed forests of the Vyatka Kama region, the degradation trend of their development in the second half of the Holocene and the prospects for further transformation into sod-podzolic soils from the soils with SHH. These objects are considered as a rare soil heritage corresponding to the status of rare and endangered soils recommended for inclusion in the network of protected natural territories of Vyatka land.

Keywords: luvisols; morphology; mineral and organic parts; age; genesis; evolution.

ВВЕДЕНИЕ

Серые (лесные) почвы – объект длительной истории исследований, фактически с момента зарождения науки о почве в конце XIX в. и выделения их В.В. Докучаевым в качестве самостоятельного с генетической точки зрения типа почв. Ученый считал “серые (“ореховые”) переходные земли” самостоятельным зональным лесостепным типом (Докучаев, 1889, 1949). Однако ряд других отечественных ученых, главным образом геоботаников и географов, а впоследствии и почвоведов: С.И. Коржинский, Г.И. Танфильев, В.И. Талиев, П.Н. Крылов, В.Р. Вильямс, И.В. Тюрин и др., выдвигали в этой связи иные точки зрения (Валеева, 2014; Докучаев, 1889, 1949; Классификация и диагностика..., 2004; Матинян и др., 2003; Тюлин, 1976; Тюрин, 1930; и др.).

Причина дискуссий объясняется рядом причин теоретико-методологического, методического и географического характера. Они вытекали, во-первых, из учения Докучаева о зональности природы и почвенного покрова. Согласно ему наблюдается четкая связь почв с биоклиматическими и другими условиями почвообразования. Поэтому он рассматривал генезис серых почв в тесной связи с природной обстановкой и считал продуктом, адекватным травянистым широколиственным лесам лесостепи (Докучаев, 1889, 1949). С другой стороны, под влиянием идей “геологов-

четвертичников” в науки о природе того времени активно проникал динамический (естественно-исторический) подход. Он лег в основу гипотезы миграции природных зон вслед за изменениями климата, рельефа и др. Геоботаником С.И. Коржинским (1887, 1891) последняя была использована в качестве руководящей идеи при рассмотрении вопроса о генезисе серых лесных почв. Согласно ей они возникли из черноземов путем деградации вследствие смещения природных зон к югу и наступления леса на степь. Эту концепцию разделяли многие ученые. Г.И. Танфильев (1896) причину деградации черноземовидных почв видел не в смене климата, а в подкисляющем влиянии лесной растительности на карбонатные почвогрунты. Согласно И.В. Тюрину (1930), серые лесные почвы восточных районов европейской России, в частности Чувашии, могли возникнуть на месте гумусированных дерново-глеевых почв при усилении степени дренирования территории долинно-балочной сетью. Эта гипотеза не противоречила условиям приуральского региона, серые почвы которого отличаются повышенным содержанием гумуса по сравнению с центральной и западной провинциями северной лесостепи.

Под иным углом зрения эволюционные идеи, касающиеся генезиса серых лесных почв, развивали В.И. Талиев, П.Н. Крылов и В.Р. Вильямс. Они считали их следствием проградации почв подзолистого семейства при улучшении биоклиматических условий (Валеева, 2014; Вильямс, 1949).

Еще одним объективным поводом для дискуссий служил факт переходного положения ареалов серых лесных почв на стыке лесного и степного биомов. Данное обстоятельство укрепляло позиции сторонников эволюционно-динамического подхода к географии и генезису почв лесостепи.

Четвертым, более поздним по времени импульсом оживления научных споров стало внедрение в практику почвенно-биохимических исследований анализа фракционно-группового состава гумуса. С его помощью была обнаружена, в частности, особая – гуматная – природа низов гумусово-аккумулятивной толщи серых почв. При этом в составе гуминовых кислот (ГК) биохимики установили наличие “степной”, черной фракции, связанной с кальцием. Почвоведы-эволюционисты расценили данный

факт как аргумент в пользу своих взглядов. С тех пор в научном обороте прочно закрепился термин “второй гумусовый горизонт” (ВГГ) как маркер остаточного от былых степных условий органо-минерального феномена (Александровский, 1983, 2008; Алифанов, 1980; Прокашев, 2006, 2009, 2015; Прокашев и др., 2003; Таргульян, Бронникова, 2019; и др.).

Вместе с тем их противники в качестве контраргументов привлекали результаты лабораторных опытов В.В. Пономаревой и Т.А. Плотниковой по изучению свойств гумусовых соединений (Пономарева, Плотникова, 1980). Из них вытекали представления о якобы высокой подвижности черных ГК и, как следствие, – о современной, инфильтрационно-иллювиальной, природе ВГГ серых лесных почв.

Внедрение во второй половине XX в. в практику почвенных анализов методики радиоуглеродного датирования ГК подтвердило факт древности органического вещества ВГГ. Судя по полученным пионерным геохронологическим данным, их возраст оказался не моложе 5–4.5 тыс. лет. Последнее укрепляло позиции сторонников пространственно-временного подхода при рассмотрении истории ландшафтов и почвенно-растительного покрова европейской лесостепи и смежных природных зон (Александровский, 1983; Прокашев, 2009; Соколов, Таргульян, 1976; Таргульян, Бронникова, 2019; Ченdev и др., 2011, 2017; Чичагова, 1985; Chendev et al., 2018; и др.). При этом отдельные авторы синтезировали геохронологические подходы с биохимическими взглядами Пономаревой и Плотниковой для обоснования более древнего – поздне-постследникового – возраста ВГГ (Алифанов, 1980). Его генезис они объясняли иллювиальной аккумуляцией подвижного гумуса на контакте деятельного слоя с мерзлыми грунтами.

Некоторые ученые причину древности гумуса склонны трактовать с позиции механического погребения ВГГ, т. е. вне связи с колебаниями климата или другими, подобными им литопедоформирующими процессами (Макеев, 2012 и др.).

Упомянутые обзорно концепции служат наглядным выражением сложности затронутой проблемы генезиса серых лесостепных почв. В не меньшей степени отмеченное касается рассматриваемого авторами региона, расположенного в более северной

ландшафтной обстановке – вне зоны лесостепи. До последнего времени его почвам не уделялось достаточного внимания с генетической точки зрения.

По-видимому, все вышеизложенное – следствие разнообразия условий и путей формирования серых почв в зависимости от природной ситуации конкретных территорий. Действительно, данные почвы формируются при полупромывном водном режиме, но в различных биоклиматических областях и фациях суб boreального пояса Евразии и Сев. Америки. Весьма разнообразен и растительный полог над этими почвами, например: зональные широколиственные леса на территории Восточноевропейской равнины, или мелколиственные осиново-березовые, или сосново-березовые с примесью лиственницы формации – в азиатской части России, повсеместно с обильной травяной растительностью. На огромных площадях целинные фитоценозы ныне трансформированы в агроландшафты и серые почвы развиваются в новых экологоландшафтных условиях, что отражается на их облике, функционировании и субстантивных свойствах. В целом считается, что тип серых почв сформировался при ведущей роли дернового процесса и сопутствующих ему элювиальных процессов, главным образом лессиважа и др. (Ахтырцев, 1992; Винокуров и др., 1966; Вологжанина, 1984; Карпова и др., 2018; Прокашев, 2006; Тюлин, 1976; Урусевская и др., 2000; Ченdev и др., 2011, 2017; Chendev et al., 2018; Chendev et al., 2019; и др.).

Изложенные проблемы имеют прямое отношение к познанию природы серых почв Вятского Прикамья (ВП). Оно находится вблизи boreального рубежа Русской равнины, на стыке лесного и лесостепного биомов. В конце XIX в. именно здесь, в пределах бывшего Малмыжского уезда Вятской губернии, С.И. Коржинским (1887) впервые было установлено наличие своеобразных почв с проблематичным строением профиля. Придерживаясь миграционной биоклиматической концепции, одни из них ученый именовал “малмыжскими черноземами”, а другие “вторично-подзолистыми” – производными от первых. Однако несовершенство методов исследования того времени не позволило автору глубоко обосновать гипотезу деградационной эволюции почв данного региона. В составе его современного почвенного покрова,

наряду с преобладающими дерново-подзолистыми и некоторыми другими, прежде всего дерново-карбонатными, типичны и серые почвы, которые находились в поле зрения казанского геоботаника. Они являются темой настоящей работы, ориентированной на презентацию своеобразия географического положения, субстантивных свойств и происхождения серых почв.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объект исследования – серые типичные почвы ВП, принадлежащие к особому роду – со вторым гумусовым горизонтом АЕl[hh]. Эти почвы занимают пограничное положение между Среднерусской и Вятско-Камской почвенными провинциями (D_{14} и D_{15} – по Добровольскому, Урусевской, 2004) дерново-подзолистых, в т. ч. с ВГГ на севере, и Нижнекамской провинцией черноземов и серых лесных почв (L_{28}) на юге. Примечателен факт наличия в северных провинциях почв с ВГГ в составе дерново-подзолистого, а отчасти и серого лесного типа. Серые почвы ВП приурочены к геоморфологическим регионам структурно-денудационных Уржумского и Мари-Турецкого плато, дренируемых долиной нижней Вятки. Северный рубеж ареала серых почв проводится примерно по широте г. Советск (58° с. ш. и 49° в. д.), а южный – в пределах Кировской области, условно соответствует ее административным границам. Доля серых почв возрастает с 30% на севере, где они представлены в основном светло-серыми, в т. ч. сильнооподзоленными подтипами, и до 50% на юге ареала с постепенным увеличением в этом направлении площади типичных и темно-серых почв (в соответствии с классификацией почв 1977 г.) (рис. 1).

В настоящей работе рассматриваются серые и агросерые почвы на покровных суглинках, занимающие плакорные позиции Уржумского и Мари-Турецкого плато, и хорошо сохранившие в профиле ВГГ. Абсолютные высоты волнисто-платообразного рельефа региона составляют около 170–190 м, относительные достигают 80–100 м.

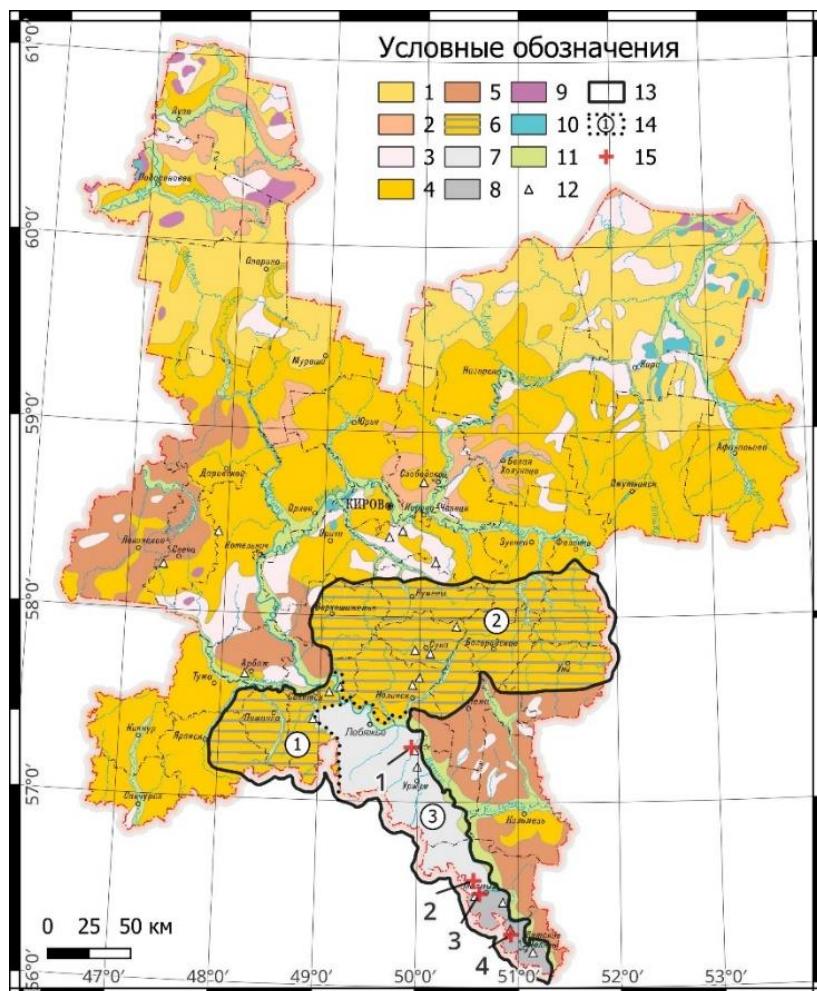


Рис. 1. Карта-схема почвенного покрова с ареалами почв с ВГГ Вятского Прикамья.

Fig. 1. Map scheme of the soil cover with the areas of soils with SHH from the Vyatka Kama region.

Почвы:

1 – подзолистые; **2** – подзолы; **3** – торфяно-подзолистые и торфяно-подзолы; **4** – дерново-подзолистые; **5** – дерново-подзолы; **6** – дерново-подзолистые, в т. ч. со вторым гумусовым горизонтом; **7** – светло-серые и серые, в т. ч. с ВГГ; **8** – темно-серые и др., в т. ч. с ВГГ, в комплексе с дерново-карбонатными; **9** – торфяные олиготрофные; **10** – торфяные эустрофные; **11** – аллювиальные; **12** – дерново-карбонатные; **13** – ареалы почв с ВГГ различной типовой принадлежности; **14** – Провинции почв с ВГГ: **1** – Ярано-Вятская (агро-)дерново-подзолистых и дерновых оглеенных почв, в т. ч. с ВГГ; **2** – Кильмезско-Чепецкая (агро-)дерново-подзолистых и дерновых оглеенных почв, в т. ч. с ВГГ; **3** – Уржумская и Мари-Турекская серых почв, в т. ч. с ВГГ; **15** – Ключевые участки с разрезами серых и агросерых почв, в т. ч. с ВГГ: 1 – разрезы *У-27, У-27a, У-29a, У-29б*; 2 – разрезы *M-13, M-14, M-15, M-16, M-17*; 3 – разрезы *M-20a, M-20б, M-20в*; 4 – разрезы *B-18, B-40, B-41*.

Почвообразующие породы представлены плащом покровных бескарбонатных и карбонатных суглинков, местами сменяемых, особенно на юге, пермскими дериватами элювия глин, мергелей, известняков, реже песчаников казанского яруса средней перми. Температуры за год составляют около 3 °С, сумма активных температур – 2 000–2 150 °С. Годовая норма осадков равна 480–500 мм, коэффициент увлажнения Высоцкого – 0.95; водный режим периодически промывного типа (География Кировской области..., 2015). Почвы развиты под смешанными лесами, т. н. орешниковыми раменями, а также под вторичными осиново-березовыми насаждениями или под господствующими здесь ныне агроландшафтами. Структура почвенного покрова представлена густо-древовидными сочетаниями-мозаиками дерново-подзолистых, серых (лесных), дерново-карбонатных и эродированных почв с почвами овражно-балочного комплекса (Вологжанина, 1984; Прокашев, Охорзин, 1996). Ввиду высокой степени распашки территории представители рода почв с бинарным гумусовым профилем частично сохранились главным образом в составе серого и темно-серого подтипов, благодаря относительно более глубокому

положению ВГГ.

Целью исследования является обсуждение происхождения серых почв. В задачи работы входило выявление условий и истории формирования почв, времени и вероятных причин возникновения бинарной гумусовой толщи. Предмет изучения: морфология профиля, субстантивные консервативные и актуальные свойства минеральной и органической части, особенности пространственного распределения, генезис и эволюция почв.

Основу комплекса методов составляли: морфологогенетический; анализ гранулометрического (по Качинскому) и валового химического состава (по Аринушкиной), $\text{pH}_{\text{водн.}}$ и pH_{KCl} – потенциометрически, гидролитической кислотности – по Каппену-Гильковицу, обменного Са и Mg – с трилоном Б, гумуса – по Тюрину в модификации Симакова, фракционно-группового состава гумуса – по Кононовой и Бельчиковой, возраста гумуса (по данным ^{14}C -датирования фракций ГК2 и ГК3 после декальцирования), подвижного фосфора и обменного калия – по Кирсанову.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные материалы базируются на данных изучения серии из 15 репрезентативных разрезов, заложенных вдоль правобережья нижней Вятки в автономных и отчасти подчиненных геоморфологических позициях (рис. 1). Ввиду высокой степени земледельческого освоения региона объектами изучения служили преимущественно агроварианты почв. В качестве примера представлены сведения по одному из типичных профилей, занимающих наиболее северное положение в составе ареала серых почв с ВГГ и всесторонне обеспеченных аналитическими характеристиками. Разрез У-27 агросерой почвы на покровном карбонатном суглинке под посевом ячменя вскрыт на платообразном междуречье Байсы и Буя в пределах Уржумского плато (рис. 2). В прошлом почва формировалась под естественной растительностью, ныне сохранившейся очагово, главным образом, по склонам балок и долин рек.

Гор. РУ, 0–30 см: коричневато-серый, влажный, ореховато-комковатый, с признаками пылеватой структуры, глинистый, рыхлый, корней много, нижняя граница ясная, ровная, местами волни-

стая.



Рис. 2. Профиль разреза У-27 агросерой почвы с реликтовым ВГГ.
Fig. 2. Profile of the U-27 agro-gray soil section with the relict second humus horizon of the Vyatka Kama region.

Гор. AEl[hh], 30–52 см: углисто-серый, свежий, зернисто-плитчатый, глинистый, уплотненный, на поверхности агрегатов слабая присыпка скелетаны, корней мало, нижняя граница ясная, волнистая.

Гор. BEl, 52–62 см: белесовато-буроватый, свежий, зернисто-ореховатый, с признаками проявления плитчатой структуры, тяжелосуглинистый, плотный, на поверхности педов скелетана, особенно заметная вдоль поровых пространств, корни редкие,

нижняя граница ясная, волнисто-языковатых очертаний.

Гор. Bt1, 62–83 см: бурый, в верхней части с белесоватым оттенком, влажный, зернисто-ореховатый, глинистый, плотный, поверхность педов с небольшой присыпкой скелетаны, корни редкие, нижняя граница не четкая, проведена по линии исчезновения скелетаны.

Гор. Bt2ca, 83–104 см: коричнево-бурый, сырой, призмовидно-ореховатый, глинистый, плотный, с заметной гумусовой “лакировкой” на поверхности педов, с глубины около 100 см отмечены локальные мелкозернистые известковые фрагменты, реагирующие с 10%-ной HCl, корни редкие, нижняя граница не четкая.

Гор. BC, 116–185 см: коричневато-бурый, сырой, с нечетко выраженным признаками призмовидной структуры, глинистый, плотный, слегка вязкий, со слабозаметными гумусовыми налетами на поверхности педов, корни единичные.

Морфология исследуемой почвы характерна для серого типа с ВГГ. Она обладает относительно развитой гумусовой толщой, которая совместно с ВГГ составляет 50 см. Суммарная мощность бинарной темноцветной толщи вдвое больше по сравнению с зональными дерново-подзолистыми почвами – характерными компонентами структуры почвенного покрова данного региона (Прокашев, 2006, 2009). Особенностью профиля является наличие гумусово-элювиального горизонта AEI[hh] с типичной для него углисто-серой, с пепельным оттенком, окраской, зернисто-пластинчатой структурой и присыпкой скелетан на поверхности педов, пропитанных темноцветным гумусом. В срединном горизонте показательно наличие глинисто-гумусовых кутан и сплошной гумусовой “лакировки”; в нижней части профиля нередко встречаются карбонатные новообразования. Возможно подстилание почв плато коренными известняковыми отложениями, что подтверждается данными по разрезу У-27а, заложенному ближе к приречной части междуречья, прилегающей к долине р. Буй. Периодические факты косвенно указывают на признаки вторичного наложения процессов элювиальной природы и коррелируют с субстантивными свойствами почвы, освещенными ниже.

Гранулометрический состав исследуемого разреза У-27 агрисерой почвы с ВГГ ВП представлен в таблице 1. Двумя основ-

ными фракциями мелкозема являются крупная пыль и ил, что характерно для почв на покровных суглинках ВП. Показательно меньшее количество ила в аккумулятивно-элювиальных горизонтах на фоне увеличения в них пылеватых частиц. Пересчет фракций мелкозема на обезыленную массу указывает на близкие величины концентрации физического песка во всех горизонтах. При средней величине содержания частиц >0.01 мм, равном 69%, наблюдается слабое варьирование этого показателя в достаточно узком диапазоне (от 61 до 74%) с минимумом в горизонте АЕ[hh]. Коэффициент вариации в 6% дает основание принять исходную материнскую породу за условно однородную.

Это позволяет считать корректными величины выноса/накопления ила в почве относительно породы. Расчеты по методу Коссовича-Роде указывают на существенное перераспределение ила и его ведущую роль в вертикальной дифференциации профиля. Последнее типично для серых почв в целом, независимо от наличия или отсутствия ВГГ. При сравнении горизонтов А(Р) и АЕ[hh] обнаруживается тенденция к минимуму илистой фракции в нижнем из них, вероятно, ввиду меньшего количества гумусовых коллоидов. Коэффициент глинистой дифференциации с учетом объемной массы (S) равен 2.43, что соответствует сильной текстурной контрастности твердой фазы профиля (Розанов, 1983).

Валовой химический состав коррелирует с гранулометрическим, подчеркивая наличие вертикальной неоднородности профиля серой почвы по элювиально-иллювиальному типу распределения ряда породообразующих элементов: Al, Fe, Mg (табл. 2). На этом фоне оксиды Si, Na, отчасти K и Ti имеют тенденцию остаточного накопления в верхней части профиля. Последнее связано с их вхождением в наиболее устойчивые первичные минералы, прежде всего кварц. Фракция ила отличается стабильностью химического состава основных элементов при пониженной концентрации Si и Ca и повышенной Al и Fe, что объясняется присутствием здесь глинистых минералов и полуторных оксидов.

Фракционно-групповой состав гумуса исследуемой почвы имеет ряд признаков, общих для почв с ВГГ иной типовой принадлежности ВП (Прокашев, 2009) (табл. 3).

Таблица 1. Гранулометрический состав агросерой почвы с ВГГ Вятского Прикамья (разрез У-27)
Table 1. Granulometric composition of agro-gray soil with SHH from the Vyatka Kama River basin (section U-27)

Горизонт, глубина, см	Содержание фракций в мм, %							Накопление - убыль ила (±), %	OM, г/см ³
	1– 0.25	0.25 –0.05	0.05– 0.01	0.01– 0.005	0.005– 0.001	<0.001	<0.01 (>0.01)*		
<i>Почва в целом</i>									
PY, 0–30	0.1	10.6	43.3	9.7	15.0	21.3	46.1	–41	1.44
AEI[hh], 30–35	0.2	3.3	46.1	15.5	15.7	19.2	50.4	–47	1.54
AEI[hh], 40–50	0.2	9.0	43.9	12.3	17.9	16.7	46.8	–54	1.54
BEI, 52–62	0.1	10.8	41.9	9.4	11.8	26.0	47.2	–28	1.56
Bt1, 75–85	0.1	7.9	40.2	5.6	12.6	33.6	51.8	–7	1.63
Bt2ca, 95–105	0.2	5.0	40.0	7.4	8.3	39.1	54.8	+8	1.60
BC, 115–125	0.6	6.4	37.1	8.3	9.3	38.3	55.9	+6	1.52
C, 135–145	5.8	11.5	29.5	6.0	10.9	36.3	53.2	–	но**
C, 155–165	5.4	5.1	27.8	7.3	12.7	41.7	61.7	–	но
C, 175–185	9.6	8.9	19.8	7.5	10.6	43.6	61.6	–	но

Продолжение таблицы 1

Table 1 continued

Горизонт, глубина, см	Содержание фракций в мм, %							Накопление - убыль ила (±), %	ОМ, г/см ³
	1– 0.25	0.25 –0.05	0.05– 0.01	0.01– 0.005	0.005– 0.001	<0.001	<0.01 (>0.01)*		
<i>В пересчете на обезыленную навеску</i>									
PY, 0–30	0.1	13.5	55.0	12.3	19.1	0	(68.6)	–	–
AEI[hh], 30–35	0.2	4.1	57.0	19.2	19.5	0	(61.3)	–	–
AEI[hh], 40–50	0.2	10.8	52.7	14.8	21.5	0	(63.7)	–	–
BEI, 52–62	0.1	14.6	56.6	12.7	15.9	0	(71.3)	–	–
Bt1, 75–85	0.1	11.9	60.5	8.4	19.0	0	(72.5)	–	–
Bt2ca, 95–105	0.3	8.2	66.0	12.1	13.5	0	(74.5)	–	–
BC, 115–125	1.0	10.4	60.1	13.4	15.1	0	(71.5)	–	–
C, 135–145	9.1	18.0	46.3	9.4	17.1	0	(73.4)	–	–
C, 155–165	9.3	8.7	47.7	12.5	21.8	0	(65.7)	–	–
C, 175–185	17.0	15.8	35.1	13.3	18.8	0	(67.9)	–	–
Среднее							(69.0)		

Примечание. * – содержание физического песка в пересчете на обезыленную навеску; ** – не определено; ОМ – объемная масса.

Note. * – the content of physical sand in terms of a dust-free suspension; ** – not determined; OM – volume mass.

Таблица 2. Валовой химический состав агросерой почвы с ВГГ Вятского Прикамья (разрез У-27)
Table 2. Gross chemical composition of agro-gray soil with SHH from the Vyatka Kama region (section U-27)

Горизонт, глубина, см	Процент от прокаленной массы									
	SiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	P ₂ O ₅	MnO
<i>Почва в целом</i>										
PY, 0–30	76.7	1.59	2.44	0.86	11.4	4.13	1.31	1.23	0.14	0.20
AEI[hh], 30–35	77.7	1.58	2.42	0.87	10.9	3.85	1.26	1.10	0.16	0.24
AEI[hh], 40–50	78.0	1.56	2.43	0.89	10.7	3.73	1.28	0.98	0.16	0.25
BEI, 52–62	74.7	1.28	2.35	0.82	12.7	5.14	1.17	1.62	0.10	0.10
Bt1, 72–82	73.2	1.31	2.29	0.84	13.4	5.78	1.20	1.85	0.11	0.08
Bt2ca, 95–105	72.4	1.25	2.30	0.84	14.0	5.99	1.18	1.84	0.10	0.08
BC, 115–125	71.2	1.31	2.34	0.85	14.5	6.35	1.23	2.01	0.11	0.11
C, 135–145	72.4	1.23	2.24	0.79	13.8	6.12	1.23	1.98	0.11	0.10
C, 155–165	71.0	1.22	2.29	0.81	14.4	6.52	1.30	2.14	0.10	0.10
C, 175–185	71.4	1.05	2.26	0.78	14.3	6.55	1.32	2.18	0.10	0.13

Продолжение таблицы 2

Table 2 continued

Горизонт, глубина, см	Процент от прокаленной массы									
	SiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	P ₂ O ₅	MnO
<i>Ил</i>										
PY, 0–30	57.2	но*	3.33	1.24	21.9	12.34	0.17	2.96	0.52	0.08
AEI[hh], 35–45	55.2	но	3.27	1.29	20.8	11.61	0.13	2.64	0.65	0.06
BEI, 52–62	57.1	но	2.67	1.03	22.7	12.66	0.08	3.18	0.24	0.07
Bt1, 72–82	56.9	но	2.52	1.03	22.7	12.84	0.05	3.36	0.25	0.07
Bt2ca, 95–105	56.9	но	2.57	1.02	22.7	12.98	0.04	3.25	0.22	0.07
BC, 115–125	57.2	но	2.51	0.99	22.7	12.78	0.05	3.28	0.20	0.07
C, 135–145	57.3	но	2.62	0.97	22.6	12.79	0.05	3.12	0.21	0.06
C, 155–165	58.2	но	2.62	0.96	22.4	12.48	0.07	2.80	0.24	0.05
C, 175–185	58.4	но	2.60	0.94	22.4	12.39	0.07	2.80	0.22	0.04
C, 175–185	58.4	но	2.60	0.94	22.4	12.39	0.07	2.80	0.22	0.08

Примечание. * – здесь и в табл. 3, 6 – не определено.

Note. * – It is not defined here and in Tables 3, 6.

Таблица 3. Состав гумуса агросерой почвы с ВГГ Вятского Прикамья, % от общего углерода (разрез У-27)

Table 3. The composition of the humus of the agro-gray soil with SHN from the Vyatka Kama region, % of total carbon (section U-27)

Горизонт, глубина, см	С общ. %	Фракции ГК		Сумма Сгк	Фракции ФК			Сумма Сфк	НО* %	Сгк : Сфк
		ГК1	ГК2		ФК1а	ФК1	ФК2			
PY, 0–30	2.18	8.3	19.3	27.6	7.2	8.3	3.2	18.7	53.7	1.5
AEI[hh], 30–35	2.00	14.5	13.5	28.0	5.1	11.5	4.0	20.6	51.4	1.4
AEI[hh], 40–50	1.86	13.4	27.4	40.8	6.1	9.1	0.5	15.7	43.5	2.6
BEI, 52–62	0.39	7.7	33.3	41.0	21.8	5.1	5.1	32.0	27.0	1.3
Bt1, 72–82	0.36	НО**	НО	НО	23.9	НО	НО	НО	НО	—
Bt2, 95–105	0.30	НО	НО	НО	30.5	НО	НО	НО	НО	—

Примечание. * НО – не гидролизуемый остаток. ** – не определено из-за низкого содержания.

Note. * – non-hydrolyzable residue. ** – not determined due to low content.

В аккумулятивно-элювиальной толще содержится наибольшее количество углерода гумуса фульвватно-гуматного состава с максимумом в пахотном слое. В нижележащем горизонте АЕ1[hh] несколько более гуматной природы его количество снижается. Минимум гумуса и степени гуматности приходятся на субэлювиальную и текстурную толщи профиля.

Обращает внимание максимальная гуматность органического вещества (ОВ) ВГГ, с отношением Сгк : Сfk равным 2.6, несмотря на визуально фиксируемые признаки оподзоленности. В составе гуминовых кислот (ГК) заметна тенденция доминирования черной фракции, связанной с Са, особенно в нижней части ВГГ. В составе фульвокислот (ФК) показательно вертикальное распределение агрессивной фракции с резким возрастанием относительной концентрации, начиная с субэлювиальной толщи.

Ввиду отсутствия фракции ГК1 определение возраста гумуса ВГГ с помощью метода ^{14}C -датирования произведено на основе экстрагирования фракций ГК2 и ГК3. Полученные данные свидетельствуют о формировании ОВ ВГГ серой почвы около 8.5–6.5 тыс. лет назад (6.5–4.5 тыс. лет до н. э.), т. е. в атлантическую и, вероятно, бореальную стадии послеледникового (табл. 4).

Возраст ГК верхнего гумусового горизонта этой почвы не был определен, однако по имеющимся в нашем распоряжении датировкам ОВ других типов почв с горизонтом АЕ1[hh] установлено, что он соответствует среднему времени пребывания углерода (mean residence time – м. р. т.) в составе гумуса горизонтов, находящихся в зоне активного обмена с атмосферным резервуаром – менее 0.8–1 тыс. лет. В агропочвах возраст ГК горизонта Р может превосходить эту величину за счет припашки реликтового ОВ ВГГ. Изложенные факты в целом указывают на двойственность – гетерохронность – гумусового профиля и на полигенетическую природу рассматриваемой почвы.

Актуальные физико-химические свойства серой почвы с ВГГ свидетельствуют о средней емкости катионного обмена (ЕКО), слабокислой реакции почвенной среды и невысоком содержании обменных оснований в верхних горизонтах, особенно в ВГГ (табл. 5).

Таблица 4. Возраст гуминовых кислот агросерых почв с ВГГ Вятского Прикамья
Table 4. Age of humic acids of agro-gray soils with SHH from the Vyatka Kama region

Разрез, №	Горизонт, глубина, см	Лаб. номер* образца	Фракция ГК	Возраст, лет	
				по ^{14}C	календарный, до н. э.
У-27	AEI[hh], 30–52	ЛУ-4636	2	5510 ± 60	4449 ± 4257
		ЛУ-4637	3	6440 ± 120	5515 ± 5295
B-18	AEI[hh], 25–32	ЛУ-3880	3	6950 ± 100	5970 ± 5730

Примечание. * – определение возраста ГК выполнено в лаборатории геоморфологических и палеогеографических исследований полярных регионов и Мирового океана ин-та наук о Земле СПбГУ (ранее – ЛГУ).

Note. * – the age of HA was determined in the Laboratory of Geomorphological and paleogeographic studies of the polar regions and the World Ocean of the Institute of Geosciences of St. Petersburg State University (formerly LSU).

Таблица 5. Физико-химические свойства агросерой почвы с ВГГ Вятского Прикамья (разрез У-27)

Table 5. Physico-chemical properties of agro-gray soil with SHH from the Vyatka Kama River basin (section U-27)

Горизонт, глубина, см	рН		Нг	Ca ⁺⁺ + Mg ⁺⁺	Ca ⁺⁺	EKO	V	Ca ⁺⁺ + Mg ⁺⁺
	H ₂ O	KCl	Смол (+)/кг				%	±, %
PY, 0–30	6.8	5.5	2.5	14.9	13.1	17.4	86	-35
AEI[hh], 30–35	6.3	5.1	3.6	12.1	10.6	15.7	77	-47
AEI[hh], 40–50	6.4	5.2	3.2	11.6	10.0	14.8	78	-40
BEI, 52–62	7.1	5.4	1.6	15.3	13.5	16.9	91	-33
Btl, 72–82	7.2	5.4	1.7	17.5	15.0	19.2	91	-23
Bt2ca, 95–105	7.1	5.2	1.9	22.5	20.1	24.4	92	-1
BC, 115–125	6.7	4.8	2.3	22.4	20.1	24.7	91	-2
C, 135–145	6.4	4.6	2.5	22.8	20.3	25.3	90	-
C, 155–165	6.5	4.7	2.6	24.6	23.1	27.2	90	-
C, 175–185	6.8	5.0	1.9	26.6	25.1	28.5	93	-

В средней и нижней частях профиля ЕКО и сумма ионов Ca и Mg примерно двукратно возрастают, хотя и с сохранением отрицательных значений относительно породы. Минимум оснований в ВГГ можно интерпретировать как индикатор усиления элювиальных тенденций на уровне субэлювиальной толщи. Степень насыщенности основаниями горизонтов профиля в целом близка к оптимальной.

Об агрохимических свойствах исследуемой почвы можно судить по таблице 6. По содержанию ОВ она относится к среднегумусным с аккумулятивным неполноразвитым типом гумусового профиля. Запасы гумуса в слое 1 м близки к высоким, из них 75% приходится на систему горизонтов РY+AE[hh]. Количество общего азота в этих горизонтах почти равное – в среднем около 0.16–0.17%, его запасы в метровой толще (по массовым данным) равны 15 т/га. Отношение С : N в обоих гумусовых горизонтах практически одинаковое, но несколько меньшее в ВГГ. Последнее может быть косвенным свидетельством большей зрелости и инертности ОВ горизонта-реликта. Гумусоаккумулятивные толщи характеризуются незначительным содержанием минеральных форм азота; количество подвижного фосфора и обменного калия соответствует низкой – средней обеспеченности.

Таким образом, рассматриваемая серая почва, бывшая на доагрогенном этапе под широколиственно-хвойными лесами ВП, имеет ряд признаков сходства с аналогичными современными почвами лесостепи. Вместе с тем нижняя часть ее гумусовой толщи фактически оказывается реликтом более ранней – (boreально-)атлантической – стадии почвообразования.

Особенности географии почв. Факт нахождения в настоящее время исследуемых серых почв с бинарным органопрофилем в подзоне смешанных лесов находится в диссонансе со взглядами ряда ученых о лесостепной природе данных почв.

Его разрешение, по нашему мнению, требует учета нескольких обстоятельств. Во-первых, факта сближения ландшафтных зон около бореального экотона на востоке европейской России, где происходит быстрое выклинивание зоны смешанных и широколиственных лесов.

Таблица 6. Агрохимические свойства агросерой почвы с ВГГ Вятского Прикамья (разрез У-27)

Table 6. Agrochemical properties of agro-gray soil with SHH from the Vyatka Kama River basin (section U-27)

Горизонт (слой), глубина, см	Гумус	С гум.	N общ.	C : N	Запасы, т/га		Подвижные (обменные) формы		
					гумус	азот	NH ₄ ⁺ / NO ₃ ⁻	P ₂ O ₅	K ₂ O
							мг/ кг почвы		
PY, 0–30	3.74	2.17	0.157	13.8	161.6	6.8	9.2	90	112
AEI[hh], 30–40	3.44	2.00	0.171	11.7	60.0	2.6	9.0	70	76
AEI[hh], 40–52	3.20	1.86	0.168	11.1	59.1	3.1	7.6	72	74
BEI, 52–62	1.92	1.12	но	но	29.9	но	5.7	135	96
Bt1, 62–83	0.90	0.52	0.039	13.3	30.8	1.3	6.4	143	116
Bt2, 83–104	0.78	0.45	но	но	21.2	но	8.2	93	125
BC, 104–116	0.72	0.42	но	но	13.1	но	8.0	164	143
0–20	–	–	–	–	107.7	но	–	–	–
0–50	–	–	–	–	270.9	но	–	–	–
0–100	–	–	–	–	362.6	но	–	–	–

Во-вторых, сложной истории палеогеографического развития рассматриваемого контактного региона ВП в послеледникование, о чём свидетельствуют результаты настоящих и более ранних палеопедологических исследований авторов (Прокашев, 2006, 2009 и др.).

Раннеголоценовая биоаккумулятивная стадия педогенеза. На поздневалдайском этапе ландшафты ВП занимали перигляциальное положение и имели тундрово-степной облик. Характерным физико-географическим процессом в то время являлся ксерокриолитогенез (Борисова, 2014, 2018; Прокашев и др., 2003). Он благоприятствовал подтягиванию к поверхности углекислых солей и формированию плаща карбонатных покровных суглинков. При последующем потеплении климата и полной деградации оледенения это привело к смещению природных зон в первой половине голоцена на 200–250 км севернее, примерно до долины р. Чепца. Около 8–5 тыс. лет назад, т. е. в бореально-атлантический интервал голоцена, на юге ВП сформировались ландшафты, сходные по облику с лесостепными. На относительно богатых породах, прежде всего покровных карбонатных суглинках, а также на элювии пермских глин и мергелей это стимулировало биогенно-аккумулятивные процессы. Их результатом стало формирование темноцветных почв с гумусовыми горизонтами мощностью до 50 см и более, с реакцией почвенной среды близкой к нейтральной. Иными словами, на юге ВП в это время сложилась стадия прогрессивной развивающей эволюции с элементами наследующей.

Позднеголоценовая биоаккумулятивно-элювиальная стадия педогенеза. В дальнейшем, около 5–6 тыс. лет назад, начиная с суб boreальной и последующей субатлантической стадий позднего голоцена, произошло относительно резкое возвратное смещение природных зон к югу. Палео-лесостепные (“атлантические”) ландшафты ВП были оттеснены менее теплолюбивыми широколиственно-хвойными формациями. В геоботанической литературе они часто именуются орешниково-раменными. Показательно, что дуб, наиболее типичный эдификатор неморальной дендрофлоры, практически отсутствует ныне на водоразделах юга ВП. Как следствие, серые лесостепные почвы и их ВГГ оказались “не в своей”

зоне, что повлекло за собой ослабление биогенно-аккумулятивных и усиление элювиальных процессов, главным образом лессиважа. Это провоцировало изменение морфологии и свойств почв, вплоть до стирания остаточных ВГГ в случае меньшего карбонатного резерва или большей интенсивности деградационных процессов с трансформацией части почв в светло-серые, или в род дерново-подзолистых почв с ВГГ. Иными словами, почвы вступили в стадию наследующей эволюции с элементами стирающей. Примечательно, что по данным изучения серых почв южного Подмосковья они формируются в современный период в условиях доминирования промывной составляющей полупромывного водного режима (Алифанов и др., 2006).

Трансформация органической части почв. Изменившиеся биоклиматические условия стали триггером начальных стадий деградации органической и минеральной части профиля серых почв. Ввиду снижения биоаккумулятивного потенциала почвообразования произошло разделение раннеголоценового темноцветного горизонта AU на два самостоятельных гумусовых горизонта – AY и AEI[hh]. На месте верхней части бывших темноцветных толщ возникли новообразованные дерновые горизонты меньшей мощности, с более низким содержанием гумуса и степени гуматности. В свою очередь, нижние части превратились в остаточные – реликтовые – дериваты ранее единых темногумусовых горизонтов. Подобные явления в равной степени коснулись как автоморфных, так и полугидроморфных серых почв.

В верхнем гумусовом горизонте постепенно произошла замена “атлантического” гумуса другим, более соответствующим изменившейся ландшафтной обстановке. В нижней части остаточной темноцветной толщи, вышедшей из активного биокруговорота, наметился тренд минерализации раннеголоценового ОВ. С ним связано преимущественное разрушение более лабильных, фульватных, компонентов и частичное преобразование черных ГК в бурье по мере выщелачивания почв. По нашему мнению, смена прогрессивной стадии эволюции на умеренно регрессивную произошла достаточно резко. Она сопровождалась изоляцией низов темноцветного горизонта от активного контакта и обмена с кислородом и углекислым газом атмосферы, что обеспечило возмож-

ность частичного сохранения его ОВ в реликтовом состоянии.

Трансформация минеральной части и поглощающего комплекса почв. Усиление в позднем голоцене элювиальных процессов привело к сингенетическим преобразованиям не только органической, но и минеральной части почв. В их числе: выщелачивание карбонатов и подкисление почв; элювиально-иллювиальное, либо элювиальное перераспределение ила, R_2O_3 , MgO ; остаточное накопление в аккумулятивно-элювиальной толще фракций пыли, устойчивых минеральных компонентов кварцевого и силикатного состава; усиление степени текстурной дифференциации профиля; появление в ряде случаев новообразованных субэлювиальных горизонтов ВЕ1, а также конкреций $CaCO_3$ в форме журавчиков на контакте с материнской породой; снижение ЕКО, суммы обменных катионов Са и Mg и насыщенности почв основаниями.

Вероятная направленность эволюции голоценовых почв с ВГГ представлена на рисунке 3.

Современные профилеобразующие процессы. В настоящее время рассматриваемые почвы по-прежнему формируются при ведущей роли биогенно-аккумулятивных процессов с дополнением сопутствующих элювиальных. Первые представлены подстилкообразованием, гумусообразованием и гумусонакоплением, вторые – лессиважем, деградацией реликтового гумуса и отчасти псевдооглеением. Их временную последовательность можно представить следующим образом: выщелачивание → лессиваж → (элювиально-глеевый процесс) → деградация гумуса → антропогенная трансформация → (водная эрозия).

В случае сохранения прогнозируемого тренда спонтанной эволюции, вызванной биоклиматическими и сопутствующими причинами, данные педообъекты будут подвергаться более глубокой деградации. Вполне вероятной представляется следующая схема дальнейшей эволюционной трансформации: светло-серые → дерново-подзолистые почвы с ВГГ → обычные дерново-подзолистые почвы, утратившие свидетельства былого темно-цветного прошлого. На сельскохозяйственных угодьях серые и подобные им почвы с бинарным гумусовым профилем уже частично или полностью утратили ВГГ ввиду агрозерозии или механического вовлечения в пахотный слой. Из этого вытекает необ-

ходимость их включения в состав особо охраняемых природных территорий – почвенных заказников или мини-заповедников – в статусе редких и исчезающих почв. Выходы таких почв в естественных береговых обнажениях могут стать объектами экологического просвещения.

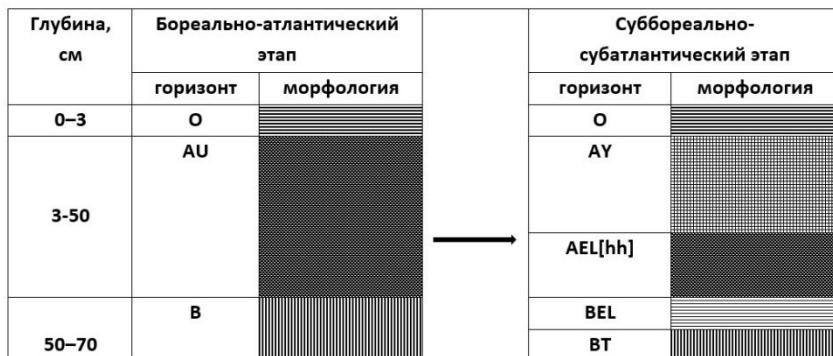


Рис. 3. Схема эволюции серых почв с ВГГ Вятского Прикамья на ранне- и позднеголоценовой стадиях эволюции.

Fig. 3. The scheme of evolution of gray soils with the second humus horizon of the Vyatka Kama region at the Early and Late Holocene stages of evolution.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Пространственно-временной анализ свидетельствует, что южная часть Вятского Прикамья в пределах зоны широколиствен-но-хвойных лесов является хранилищем ценного почвенного наследия в виде специфического рода серых почв с бинарным гумусовым профилем. Они развиты на покровных суглинках и некоторых коренных пермских карбонатно-глинистых породах. Нижняя часть их аккумулятивно-элювиальной толщи представляет собой т. н. второй – остаточный – гумусовый горизонт AEI[hh]. От вышележащего дернового горизонта AY(PY) этот феномен обычно отличается более темной окраской при меньшем содержании гумуса, гуматно-кальциевым составом, раннеголоценовым (“атлантическим”) возрастом органического вещества, составляющим 8.5–6.5 тыс. лет, зернисто-плитчатой структурой, наличием замет-

ного количества скелетан на поверхности агрегатов и других признаков полигенеза.

Минеральная часть серой почвы с ВГГ характеризуется четкой текстурной дифференциацией профиля, подтверждаемой гранулометрическими и валовыми химическими анализами. Вынос ила из аккумулятивно-элювиальной толщи составляет 40–50% относительно материнской породы, коэффициент общей глинистой дифференциации профиля – около 2.5.

Актуальные свойства рода почв с ВГГ аналогичны обычным серым почвам: средне-слабокислая реакция, невысокая гидролитическая кислотность, средняя емкость поглощения, благоприятная степень насыщенности основаниями. При этом отмечается вынос обменных катионов кальция и магния, наиболее значительный из аккумулятивно-элювиальной зоны профиля, и особенно из ВГГ. Запасы гумуса в метровой толще достаточно высокие – более 350 т/га, однако обеспеченность доступными для растений формами калия, фосфора и особенно азота невелика, на уровне средней и низкой.

Субстантивные свойства косвенно свидетельствуют о наличии в истории формирования серых почв на протяжении последниковья не менее двух стадий с различной интенсивностью биоаккумулятивных и элювиальных процессов.

На раннем – (бореально-)атлантическом – этапе они функционировали в проградационном режиме развития и в иных палеоландшафтных условиях. Наиболее близким аналогом последних может служить лесостепь Русской равнины, граница которой сместилась на 200–250 км севернее современного положения. В условиях более мягкого климата и на богатых, насыщенных основаниями породах тогда сформировались темноцветные почвы с дерновым горизонтом мощностью около 50 см. Данная стадия интерпретируется как развивающаяся эволюция с элементами наследующей.

При достаточно резком возвратном смещении природных зон к югу во второй половине голоценена произошло снижение биоаккумулятивного потенциала почвообразования и усиление признаков деградации минеральной и органической части почв. Их следствием стало, во-первых, разделение ранее единого темногу-

мусового горизонта на верхнюю и нижнюю толщи, т. е. на современные горизонты AY и AEI[hh] и, во-вторых, на элювиальную и текстурную толщи профиля. Подобная стадия развития соответствует режиму наследующей эволюции с элементами стирающей.

В настоящее время формирование данных почв находится под контролем следующих основных процессов педогенеза: подстилкообразование и дерновый в группе биоаккумулятивных, лессиваж, (элювиально-глеевый) и деградация гумуса – в группе элювиальных. В агроландшафтах они часто сочетаются с негативными процессами техногенного характера, вплоть до полного исчезновения горизонта-реликта.

Таким образом серые почвы с ВГГ Вятского Прикамья полигенетичны по своей природе. На протяжении последних 5 тыс. лет эволюции они находятся в состоянии умеренного деградационного стресса, вызванного первоначально спонтанными, а позднее и антропогенными факторами. Подобные почвы фактически постепенно переходят в категорию редких или исчезающих и нуждаются в соответствующем внимании со стороны научного сообщества и природоохранных структур. Они должны стать объектом сбережения в качестве уникального педогенного наследия и занять достойное место в составе охраняемых природных территорий региона исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александровский А.Л. Эволюция почв Восточно-Европейской равнины в голоцене. М.: Наука, 1983. 152 с.
2. Александровский А.Л. Запись природной среды в почвах голоцена / отв. ред. В.О. Таргульян, С.В. Горячкин // Память почв: почва как память биосферно-геосферно-антропосферных взаимодействий. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. 692 с.
3. Александровский А.Л., Ченdev Ю.Г., Юртаев А.А. Почвы со вторым гумусовым горизонтом и палеочерноземы как свидетельства эволюции педогенеза в голоцене на периферии лесной зоны и в лесостепи (обзор) // Почвоведение. 2022. № 2. С. 147–167.
4. Алифанов В.М. Палеогеографические аспекты формирования серых лесных почв // Генезис, плодородие и мелиорация почв. Пущино, 1980. С. 44–58.
5. Алифанов В.М., Гугалинская Л.А., Иванникова Л.А. Оценка и прогноз

- гидротермических условий почвообразования серых почв // Почвенные процессы и пространственно-временная организация почв / отв. ред. *В.Н. Кудеяров*. М.: Наука, 2006. С. 471–426.
6. Ахтырцев Б.П. К истории формирования серых лесных почв Среднерусской лесостепи // Почловедение. 1992. № 3. С.5–18.
7. Борисова О.К. Изменения растительности и климата в центральном регионе Русской равнины в голоцене: к проблеме участия граба в лесных сообществах // В.М. Лозовский, О.В. Лозовская (ред.) Природная среда и модели адаптации озерных поселений в мезолите и неолите лесной зоны Восточной Европы. СПб: ИИМК РАН, 2014. С. 37–40.
8. Борисова О.К. Развитие растительности на верхневолжской низменности и прилегающих возвышенностях в голоцене: реконструкция по палеоботаническим данным // Стоянка Замостье 2 и развитие природной среды Волго-Окского междуречья в голоцене: Коллективная монография / Сост. О.В. Лозовская, В.М. Лозовский. СПб: ИИМК РАН, 2018. С. 9–30.
9. Валеева А.А. Серые лесные почвы Волжско-Камской лесостепи: количественный подход к классификации: Дис. ... канд. биол. наук. Казань, 2014. 137 с.
10. Вильямс В.Р. Травопольная система земледелия: Избр. труды. М., 1949. 342 с.
11. Винокуров М.А., Колоскова А.В., Фаткуллин А.Ш. Татарская АССР. Серые лесные почвы // Агрохимическая характеристика почв СССР. Районы Поволжья. М., 1966. С. 28–49.
12. Вологжанина Т.В. Серые лесные почвы зоны широколиственных лесов Русской равнины: Автorefерат дисс. ... докт. с.-х. наук. М., 1984. 51 с.
13. География Кировской области. Атлас-книга / под ред. Е.А. Колеватых, А.М. Прокашева, Г.А. Русских. Киров: Кир. обл. тип., 2015. 80 с.
14. Добропольский Г.В., Урусевская И.С. География почв. М.: Изд-во МГУ, Изд-во “КолосС”, 2004. 460 с.
15. Докучаев В.В. Методы исследования вопроса: были ли леса в Южной степной России? Сообщ. В.В. Докучаева в торжеств. собр. Имп. Вольн. экон. о-ва, 31 окт. 1888 г. С-Пб: тип. В. Демакова, 1889. 38 с.
16. Докучаев В.В. К вопросу о соотношениях между возрастом и высотой местности, с одной стороны, характером и распределением черноземов, лесных земель и солонцев, с другой. “Сочинения”. Т. 1. М.: изд. АН СССР, 1949. С. 378–404.
17. Караваева Н.А., Черкинский А.Е., Горячкин С.В. Понятие “второй гумусовый горизонт”: опыт генетико-эволюционной систематизации //

- Успехи советского почвоведения. М.: Наука, 1986. С. 167–173.
18. Карпова Д.В., Балабко П.Н., Чижикова Н.П., Бескин Л.В., Колобова Н.А., Хуснетдинова Т.И., Цымбарович П.Р., Беляева М.В. Микроморфология и минералогия серых лесных почв владимирского ополья // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2018. Вып. 94. С. 101–123. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2018-94-101-123>.
19. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
20. Коржинский С.И. Предварительный отчет о почвенных и геоботанических исследованиях 1886 года в губерниях Казанской, Самарской, Уфимской, Пермской и Вятской // Тр. Об-ва естествоиспыт. при Казанском ун-те. Казань, 1887. 72 с.
21. Коржинский С.И. Северная граница черноземностепной области восточной полосы Европейской России в ботаническом и почвенном отношении // Тр. Об-ва естествоиспыт. при Казанском ун-те. 1891. Т. 22. № 6. 204 с.
22. Макеев А.О. Поверхностные палеопочвы лесовых водоразделов Русской равнины. М.: Молнет, 2012. 260 с.
23. Матинян Н.Н., Керзум П.П., Русаков А.В. Ландшафтно-исторические аспекты генезиса серых лесных почв северо-западной окраины Владимирского ополья // Почвоведение. 2003. № 5. С. 517–527.
24. Пономарева В.В., Плотникова Т.А. Гумус и почвообразование. Л.: Наука, ЛО, 1980. 224 с.
25. Прокашев А.М. Серые полигенетические почвы Вятского Прикамья. Киров: Изд-во ВятГГУ, 2006. 187 с.
26. Прокашев А.М. Генезис и эволюция почв бассейна Вятки и Камы (по палеопочвенным данным). Киров: Изд-во ВятГГУ, 2009. 386 с.
27. Прокашев А.М. Голоценовая эволюция и антропогенная трансформация почвенного покрова Вятского Прикамья // Эволюция почв и почвенного покрова. Теория, разнообразие природной эволюции и антропогенных трансформаций. М.: ГЕОС, 2015. С. 401–421.
28. Прокашев А.М., Охорзин Н.Д. Почвы и почвенный покров // Природа, хозяйство, экология Кировской области. Киров, 1996. С. 196–221.
29. Прокашев А.М., Жукова И.А., Пахомов М.М. История развития почвенно-растительного покрова Вятско-Камского края в послеледниковые. Киров, 2003. 143 с.
30. Розанов Б.Г. Морфология почв. М.: Изд-во МГУ, 1983. 320 с.
31. Соколов И.А., Таргульян В.О. Взаимодействие почвы и среды: почвапамять и почва-момент // Изучение и освоение природной среды. М.: Наука, 1976. С. 150–164.

32. Танфильев Г.И. О владимирском черноземе // Тр. Вольн. экон. Об-ва. С-Пб: тип. В. Демакова, 1896. С. 47–53.
33. Таргульян В.О., Бронникова М.А. Память почв: теоретические основы концепции, современное состояние и перспективы развития // Почвоведение. 2019. № 3. С. 259–275.
34. Тюлин В.В. Почвы Кировской области. Киров: Волго-Вятск. кн. изд., 1976. 288 с.
35. Тюрин И.В. К вопросу о генезисе и классификации лесостепных и лесных почв // Учен. зап. Казан. ун-та. 1930. Т. 90. Кн. 3–4. С. 429–462.
36. Урусевская И.С., Мешалкина Ю.Л., Хохлова О.С. Географо-генетические особенности гумусного состояния серых лесных почв // Почвоведение. 2000. № 11. С. 1377–1390.
37. Ченdev Ю.Г., Александровский А.Л., Хохлова О.С., Смирнова Л.Г., Новых Л.П., Долгих А.В. Антропогенная эволюция серых лесостепных почв южной части Среднерусской возвышенности // Почвоведение. 2011. № 1. С. 3–15.
38. Ченdev Ю.Г., Александровский А.Л., Хохлова О.С., Дергачева М.И., Петин А.Н., Голотвин А.Н., Сарапулкин В.А., Земцов Г.Л., Уваркин С.В. Эволюция лесостепного почвообразования на юге лесостепи Среднерусской возвышенности в голоцене // Почвоведение. 2017. № 1. С. 3–16.
39. Чичагова О.А. Радиоуглеродное датирование гумуса почв. М.: Наука, 1985. 158 с.
40. Chendev Y.G, Aleksandrovskiy A.L., Khokhlova O.S., Skripkin V.V. ^{14}C Dating to study the development of soils in the Forest-Steppe of the Central Russian Upland as a result of bioclimatic changes and long-term cultivation // Radiocarbon. 2018. No. 60(4). P. 1185–1198. DOI: <https://doi.org/10.1017/RDC.2018.40>.
41. Chendev Y.G., Golyeva A.A., Dolgikh A.V., Uvarkin S.V. Soils of Archeological Landscape Sorokino 1 (Orel Oblast): Reconstruction of Natural Changes and Anthropogenic Transformation of the Environment // Eurasian Soil Science. 2019. Vol. 52. No. 6. P. 619–631.

REFERENCES

1. Aleksandrovskii A.L., *Evolyutsiya pochv Vostochno-Evropeiskoi ravniny v golotsene* (Evolution of the soils of the East European Plain in the Holocene), Moscow: Nauka, 1983, 152 p.
2. Aleksandrovskii A.L., *Zapis' prirodnoi sredy v pochvakh golotsena* (Recording of the natural environment in Holocene soils), Moscow: Izd-vo LKI, 2008, 692 p.

3. Aleksandrovskii A.L., Chendev Yu.G., Yurtaev A.A., Pochvy so vtorym gumusovym gorizontom i paleochernozemy kak svidetel'stva evolyutsii pedogeneza v golotsene na periferii lesnoi zony i v lesostepi (obzor) (Soils with a second humus horizon and paleocernozems as evidence of the evolution of pedogenesis in the Holocene on the periphery of the forest zone and in the forest steppe (review)), *Pochvovedenie*, 2022, No. 2, pp. 147–167.
4. Alifanov V.M., *Paleogeograficheskie aspekty formirovaniya serykh lesnykh pochv* (Paleogeographic aspects of the formation of gray forest soils), Pushchino, 1980, pp. 44–58.
5. Alifanov V.M., Gugalinskaya L.A., Ivannikova L.A., *Otsenka i prognoz gidrotermicheskikh uslovii pochvoobrazovaniya serykh pochv* (Assessment and forecast of hydrothermal conditions of gray soil formation), Moscow: Nauka, 2006, pp. 471–426.
6. Akhtyrtsev B.P., K istorii formirovaniya serykh lesnykh pochv Srednerusskoi lesostepi (On the history of the formation of gray forest soils of the Central Russian forest steppe), *Pochvovedenie*, 1992, No. 3, pp. 5–18.
7. Borisova O.K., *Izmeneniya rastitel'nosti i klimata v tsentral'nom regione Russkoi ravniny v golotsene: k probleme uchastiya graba v lesnykh soobshchestvakh* (Vegetation and climate changes in the Central region of the Russian Plain in the Holocene: on the problem of hornbeam participation in forest communities), Saint-Petersburg: IIMK RAN, 2014, pp. 37–40.
8. Borisova O.K., *Razvitie rastitel'nosti na verkhnevolzhskoi nizmennosti i prilegayushchikh vozvyshennostyakh v golotsene: rekonstruktsiya po paleobotanicheskim dannym* (Vegetation development in the Upper Volga Lowland and adjacent uplands in the Holocene: reconstruction based on paleobotanical data), Saint-Petersburg: IIMK RAN, 2018, pp. 9–30.
9. Valeeva A.A., *Serye lesnye pochvy Volzhsko-Kamskoi lesostepi: kolichestvennyi podkhod k klassifikatsii: Diss. kand. biol. nauk* (Gray forest soils of the Volga-Kama forest-steppe: a quantitative approach to classification, Cand. biol. sci. thesis), Kazan, 2014, 137 p.
10. Vil'yams V.R., *Travopol'naya sistema zemledeliya* (Grass-field farming system), Moscow, 1949, 342 p.
11. Vinokurov M.A., Koloskova A.V., Fatkullin A.Sh., *Tatarskaya ASSR. Serye lesnye pochvy* (The Tatar ASSR. Grey forest soils), Moscow, 1966, pp. 28–49.
12. Vologzhanina T.V. *Serye lesnye pochvy zony shirokolistvennykh lesov Russkoi ravniny: Avtoreferat diss. doc. s.-kh. nauk* (Gray forest soils of the broadleaf forests of the Russian Plain, Extended abstract of Dr. Agri. sci. thesis), Moscow, 1984, 51 p.
13. Kolevatykh E.A., Prokashev A.M., Russkikh G.A., *Geografiya Kirovskoi oblasti. Atlas-kniga* (Geography of the Kirov region. Atlas-book), Kirov: Kir.

obl. tip., 2015, 80 p.

14. Dobrovol'skii G.V., Urusevskaya I.S., *Geografiya pochv* (Geography of soils), Moscow: Izd-vo MGU, Izd-vo "KolosS", 2004, 460 p.
15. Dokuchaev V.V., *Metody issledovaniya voprosa: byli li lesa v Yuzhnoi stepnoi Rossii?* (Research methods of the question: were there forests in Southern steppe Russia?), Saint-Petersburg: tip. V. Demakova, 1889, 38 p.
16. Dokuchaev V.V., K voprosu o sootnosheniyakh mezhdu vozrastom i vysotoi mestnosti, s odnoi storony, kharakterom i raspredeleniem chernozemov, lesnykh zemel' i solontsev, s drugoi (To the question of the relationship between the age and height of the terrain, on the one hand, the nature and distribution of chernozems, forest lands and salt marshes, on the other), Moscow: izd. AN SSSR, 1949, p. 378–404.
17. Karavaeva N.A., Cherkinskii A.E., Goryachkin S.V., *Ponyatie "vtoroi gumusovyi horizont": opyt genetiko-evolyutsionnoi sistematizatsii* (The concept of the "second humus horizon": the experience of genetic and evolutionary systematization), Moscow: Nauka, 1986, pp. 167–173.
18. Karpova D.V., Balabko P.N., Chizhikova N.P., Beskin L.V., Kolobova N.A., Husnetdinova T.I., Tsybarovich P.R., Belyaeva M.V., The micromorphology and mineralogy of gray forest soils in Vladimir Opolye, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2018, Vol. 94, pp. 101–123, DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2018-94-101-123>.
19. *Klassifikatsiya i diagnostika pochv Rossii* (Classification and diagnostics of Russian soils), Smolensk: Oikumena, 2004, 342 p.
20. Korzhinskii S.I., *Predvaritel'nyi otchet o pochvennykh i geobotanicheskikh issledovaniyah 1886 goda v guberniyakh Kazanskoi, Samarskoi, Ufimskoi, Permskoi i Vyatskoi* (Preliminary report on soil and geobotanical research in 1886 in the provinces of Kazan, Samara, Ufa, Perm and Vyatka), Kazan, 1887, 72 p.
21. Korzhinskii S.I., *Severnaya granitsa chernozemnostepnoi oblasti vostochnoi polosy Evropeiskoi Rossii v botanicheskem i pochvennom otnoshenii* (The northern boundary of the chernozem steppe region of the eastern strip of European Russia in terms of botany and soil), Kazan, 1891, 204 p.
22. Makeev A.O., *Poverkhnostnye paleopochvy lessovykh vodorazdelov Russkoi ravniny* (Surface paleosolaves of loess watersheds of the Russian Plain), Moscow: Molnet, 2012, 260 p.
23. Matinyan N.N., Kerzum P.P., Rusakov A.V., Landshaftno-istoricheskie aspekty genezisa serykh lesnykh pochv severo-zapadnoi okrainy Vladimirskogo opol'ya (Landscape and historical aspects of the genesis of gray forest soils in the northwestern outskirts of the Vladimir Opole region), *Pochvovedenie*, 2003, No. 5, pp. 517–527.

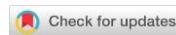
24. Ponomareva V.V., Plotnikova T.A., *Gumus i pochvoobrazovanie* (Humus and soil formation), Leningrad: Nauka, 1980, 224 p.
25. Prokashev A.M., *Serye poligeneticheskie pochyv Vyatskogo Prikam'ya* (Gray polygenetic soils of the Vyatka Kama region), Kirov: Izd-vo VyatGGU, 2006, 187 p.
26. Prokashev A.M., *Genezis i evolyutsiya pochv basseina Vyatki i Kamy (po paleopochvennym dannym)* (Genesis and evolution of the soils of the Vyatka and Kama basins (according to paleosurface data)), Kirov: Izd-vo VyatGGU, 2009, 386 p.
27. Prokashev A.M., *Golotsenovaya evolyutsiya i antropogennaya transformatsiya pochvennogo pokrova Vyatskogo Prikam'ya* (Holocene evolution and anthropogenic transformation of the Vyatka Kama Region soil cover), Moscow: GEOS, 2015, pp. 401–421.
28. Prokashev A.M., Okhorzin N.D., *Pochvy i pochvennyi pokrov* (Soils and ground cover), Kirov, 1996, pp. 196–221.
29. Prokashev A.M., Zhiukova I.A., Pakhomov M.M., *Istoriya razvitiya pochvenno-rastitel'nogo pokrova Vyatsko-Kamskogo kraja v poslelednikov'e* (The history of the development of the soil and vegetation cover of the Vyatka-Kama region in the post-glacial period), Kirov, 2003, 143 p.
30. Rozanov B.G., *Morfologiya pochv* (Soil morphology), Moscow: Izd-vo MGU, 1983, 320 p.
31. Sokolov I.A., Targul'yan V.O., *Vzaimodeistvie pochvy i sredy: pochvapamyat' i pochva-moment* (The interaction of soil and environment: soil-memory and soil-moment), Moscow: Nauka, 1976, pp. 150–164.
32. Tanfil'ev G.I., *O vladimirskom chernozeme* (About Vladimir chernozem), Saint-Petersburg: tip. V. Demakova, 1896, pp. 47–53.
33. Targul'yan V.O., Bronnikova M.A., *Pamyat' pochv: teoreticheskie osnovy kontseptsii, sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya* (Soil memory: theoretical foundations of the concept, current state and development prospects), *Pochvovedenie*, 2019, No. 3, pp. 259–275.
34. Tyulin V.V., *Pochvy Kirovskoi oblasti* (Soils of the Kirov region), Kirov: Volgo-Vyatsk. kn. izd., 1976, 288 p.
35. Tyurin I.V., *K voprosu o genezise i klassifikatsii lesostepnykh i lesnykh pochv* (On the genesis and classification of forest-steppe and forest soils), *Uchen. zap. Kazan. un-ta*, 1930, Vol. 90, pp. 429–462.
36. Urusevskaia I.S., Meshalkina Yu.L., Khokhlova O.S., *Geografo-geneticheskie osobennosti gumusnogo sostoyaniya serykh lesnykh pochv* (Geographical and genetic features of the humus state of gray forest soils), *Pochvovedenie*, 2000, No. 11, pp. 1377–1390.
37. Chendev Yu.G., Aleksandrovskii A.L., Khokhlova O.S., Smirnova L.G., Novykh L.L., Dolgikh A.V., *Antropogennaya evolyutsiya serykh lesostepnykh*

- pochv yuzhnoi chasti Srednerusskoi vozvyshennosti (Anthropogenic evolution of gray forest-steppe soils in the southern part of the Central Russian Upland), *Pochvovedenie*, 2011, No. 1, pp. 3–15.
38. Chendev Yu.G., Aleksandrovskii A.L., Khokhlova O.S., Dergacheva M.I., Petin A.N., Golotvin A.N., Sarapulkin V.A., Zemtsov G.L., Uvarkin S.V., Evolyutsiya lesostepnogo pochvoobrazovaniya na yuge lesostepi Srednerusskoi vozvyshennosti v golotsene (Evolution of forest-steppe soil formation in the south of the forest-steppe of the Central Russian Upland in the Holocene), *Pochvovedenie*, 2017, No. 1, pp. 3–16.
39. Chichagova O.A., *Radiouglerodnoe datirovanie gumusa pochv* (Radiocarbon dating of soil humus), Moscow: Nauka, 1985, 158 p.
40. Chendev Yu.G., Aleksandrovskiy A.L., Khokhlova O.S., Skripkin V.V., ¹⁴C Dating to study the development of soils in the Forest-Steppe of the Central Russian Upland as a result of bioclimatic changes and long-term cultivation, *Radiocarbon*, 2018, No. 60(4), pp. 1185–1198.
41. Chendev Yu.G., Golyeva A.A., Dolgikh A.V., Uvarkin S.V., Soils of Archeological Landscape Sorokino 1 (Orel Oblast): Reconstruction of Natural Changes and Anthropogenic Transformation of the Environment, *Eurasian Soil Science*, 2019, Vol. 52, No. 6, pp. 619–631.

УДК 631.4



DOI: 10.19047/0136-1694-2025-125-78-110



Ссылки для цитирования:

Анциферова О.А. Пирогенная деградация и потери углерода на выработанном осушенном верховом торфянике // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2025. Вып. 125. С. 78-110. DOI: 10.19047/0136-1694-2025-125-78-110

Cite this article as:

Antsiferova O.A., Pyrogenic degradation and carbon loss in cut-over drained peatland, Dokuchaev Soil Bulletin, 2025, V. 125, pp. 78-110, DOI: 10.19047/0136-1694-2025-125-78-110

Благодарность:

Работа выполнена в рамках государственного задания БФУ им. И. Канта по теме НИР “Климатический мониторинг природных и антропогенных систем Калининградской области в условиях глобальных изменений окружающей среды” (FZWM-2024-0015) в части реализации проекта Министерства науки и высшего образования РФ по созданию карбоновых полигонов.

Acknowledgments:

The work was carried out within the framework of the state assignment of the Immanuel Kant Baltic Federal University on the research topic “Climate monitoring of natural and anthropogenic systems of the Kaliningrad region in the context of global environmental change” (FZWM-2024-0015), and in particular as implementation of the project of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation on the creation of carbon polygons.

Пирогенная деградация и потери углерода на выработанном осушенном верховом торфянике

© 2025 г. О. А. Анциферова

Балтийский Федеральный университет им. И. Канта,
236041, Калининград, ул. Александра Невского, 14.

ФГБОУ ВО “Калининградский государственный технический
университет”,
236022, Калининград, Советский проспект, 1.

*<https://orcid.org/0000-0001-5389-7243>,
e-mail: olga.antsiferova@kltu.ru.

Поступила в редакцию 03.07.2025, принята к публикации 16.09.2025

Резюме: Современные климатические изменения обостряют проблему торфяных пожаров и требуют выработки единого методического подхода для оценки потерь углерода. Исследование проведено в 2024–2025 гг. на территории выработанного торфяного месторождения верхового типа, подвергшегося пожарам в 2011 г. и расположенного в пределах Калининградской области (Юго-Восточная Прибалтика). Методология сочетает традиционные подходы почвоведения (профильный метод) с геоботаническими приемами выявления индикаторной роли древесной растительности при определении глубины прогорания и осадки постпирогенной поверхности. В качестве основы прикладной оценки пирогенно-измененных почв использована классификация интенсивности почвенных пожаров по глубине выгорания торфяного слоя, принятая в области лесной пирологии. На примере двух тестовых участков, отличающихся строением остаточной торфяной залежи, мощностью органогенного профиля и локальными особенностями осушения, изучены потери углерода в полосе кавальеров и на торфяных картах. Показано, что при слабых пожарах происходит пирогенная деградация преимущественно верхних слоев торфяных почв, что сопровождается потерями от 5.31 до 20.2 кг С/м². При пожарах средней интенсивности пирогенная деградация захватывает как верхние, так и глубокие слои торфяного профиля с образованием подземных полостей выгорания, а также горизонтов термически измененного торфа. Потери углерода возрастают до 24.5–36.7 кг С/м². В очагах сильных пожаров весь торфяной профиль, исходно представлявший залежь смешанного типа, подвергается пирогенной деградации с необратимой потерей большей части горизонтов и общей убылью углерода 50.36–65.40 кг С/м². Участки сильных пожаров приурочены к почвам кавальеров. В пространственном аспекте потери углерода складываются из долевого участия очагов пожаров разной силы в общей мозаичной картине постпирогенной поверхности. Густая сеть открытых мелких каналов способствует быстрому распространению пожара внутрь торфяника по кавальерам, что в итоге приводит к высоким площадным потерям углерода за счет более глубокой пирогенной деградации почв на торфяных картах.

Ключевые слова: болотные почвы; торфяные пожары; глубина прогорания; пирогенные потери углерода.

Pyrogenic degradation and carbon loss in cut-over drained peatland

© 2025 O. A. Antsiferova

*Immanuel Kant Baltic Federal University,
14 A. Nevskogo St., Kaliningrad 236041, Russian Federation.*
*Kaliningrad State Technical University,
1 Sovetsky Prospekt, Kaliningrad 236022, Russian Federation.*

*<https://orcid.org/0000-0001-5389-7243>,
e-mail: olga.antsiferova@kltu.ru.

Received 03.05.2025, Accepted 16.09.2024

Abstract: Modern climate change exacerbates the problem of peat fires and requires a unified methodological approach for assessing carbon losses. The study was conducted in 2024–2025 on the territory of a developed high-moor peat deposit that was affected by fires in 2011 and is located within the Kaliningrad region (South-Eastern Baltic region). The methodology combines traditional approaches of soil science (profile method) with geobotanical techniques of revealing the indicator role of woody vegetation in determining the depth of burning and precipitation of the post-pyrogenetic surface. As a basis for the applied assessment of pyrogenically altered soils, the classification of the intensity of soil fires by the depth of burning of the peat layer, adopted in the field of forest pyrology, is used. Using the example of two test sites with different residual peat deposits, organic profile thickness, and local drainage features, we studied carbon losses in the cavalier strip and on peat maps. It was shown that weak fires cause pyrogenic degradation of the upper layers of peat soils, resulting in losses ranging from 5.31 to 20.2 kg C/m². In medium-intensity fires, pyrogenic degradation affects both the upper and lower layers of the peat profile, resulting in the formation of underground combustion cavities and thermally altered peat horizons. Carbon losses increase to 24.5–36.7 kg C/m². In the areas of strong fires, the entire peat profile, which was originally a mixed-type deposit, undergoes pyrogenic degradation with an irreversible loss of most of the horizons and a total carbon loss of 50.36–65.40 kg C/m². The areas of strong fires are confined to the soils of the cavalier. In the spatial aspect, carbon losses are composed of the share of fire foci of different strength in the overall mosaic pattern of the post-pyrogenetic surface. A dense network of open shallow channels contributes to the rapid spread of fire into the peatland along the cavalier, which ultimately leads to high area-based carbon losses due to deeper pyrogenic degradation of soils on peat maps.

Keywords: bog soils; peat fires; depth of burning; pyrogenic carbon losses.

ВВЕДЕНИЕ

Пирогенное воздействие на торфяные почвы является самым опасным и разрушительным фактором их деградации, приводящим к потере органического углерода и выбросам парниковых газов (Rein, Huang, 2021; Che Azmi et al., 2021; Sirin et al., 2021). Актуальность проблемы также состоит в том, что торфяные пожары вносят существенный вклад в глобальную антропогенную эмиссию углерода до 15% (Poulter et al., 2006). Ряд авторов отмечает увеличение частоты пожаров на торфяниках в связи с климатическими изменениями на фоне изменения структуры землепользования (Schmidt, 2024; Wilkinson et al., 2023). Проблема изучения последствий пирогенной деградации особенно актуальна для России, где торфяные почвы занимают огромные площади – по разным данным от 143.5 до 193.4 млн га (Конюшков и др., 2022).

Наиболее подвержены пожарам осушенные и особенно выработанные торфяные месторождения (Зайдельман, Шваров, 2002; Зайдельман, Романов, 2007; Торф..., 2013; Медведева и др., 2023), на которых остаточный торфяной слой подвержен длительному и глубокому горению по типу тления (Turetsky et al., 2015; Рекомендации по тушению..., 2020; Мокряк, Париjsкая, 2021).

Результатом торфяных пожаров является пирогенная деградация болотных почв, которая выражается в трансформации органического углерода в жидкие, газообразные продукты горения и аэрозоли (дым, сажа, CO, CO₂, H₂), возникновении пирогенных образований, изменения спектральной отражательной способности поверхности. Помимо этого, формируется постпирогенный микро- и мезорельеф (буристо-котловинный с подземными полостями), изменяется гидротермический режим болотных экосистем, их видовое разнообразие.

Недостаточная изученность проблемы оценки последствий пирогенного воздействия на торфяные почвы в бореальном поясе ограничивает возможности составления точных прогнозов постпирогенного снижения запасов органического вещества в целом и углерода в частности. В связи с этим отмечается возрастающий интерес к разработке методологии оценки потерь органического углерода и эмиссии газов при пожарах на торфяниках (Глу-

хова, Сирин, 2018; Сирин и др., 2019; Ефремова и др., 2021). При этом выделяется группа методов натурных определений путем сопоставления зольности сгоревшего и несгоревшего торфа (Turetsky, Weider, 2001; Ефремова и др., 2021) и по положению корневой шейки (Davies et al., 2013; Сирин и др., 2019). Также апробируется группа дистанционных методов путем сопоставления разновременных съемок (Reddy et al., 2015; Сирин, 2018). Однако до настоящего времени не выработана единая методическая база для оценки потерь углерода от торфяных пожаров. В то же время в области лесной пирологии и методических основ тушения осушенных торфяников (Рекомендации по тушению, 2020; Залесов, 2021; Способы тушения, 2024) для оценки интенсивности торфяных пожаров используют шкалу из классификации Н.П. Курбатского (Курбатский, 1962). Эта группировка основана на глубине прогорания торфа: при пожарах слабой интенсивности – менее 25 см, при средней – 25–50 см, при сильной – свыше 50 см. По нашему мнению, данная шкала вполне может быть приложима к оценке степени пирогенной деградации торфяных почв при пожарах разной интенсивности и расчетам потерь углерода. Таким образом, реализуется междисциплинарный подход для решения прикладной задачи.

Актуальность проблемы торфяных пожаров на региональном уровне заключается в широком распространении болотных почв и интенсивном их использовании (промышленном и сельскохозяйственном). К середине XX в. болота занимали 6% территории Калининградской области (Калининградская область, 2011). При этом фонд промышленных месторождений торфа составляет 64.5 тыс. га (Географический алас, 2002). На землях сельскохозяйственного назначения торфяные почвы занимают 4.4%. Большая часть крупных торфяных массивов расположена на польдерных землях Славского и Полесского округов вдоль побережья Куршского залива в пределах Неманской и Полесской низменностей. Помимо этого, в физико-географическом аспекте на территории области выделяются торфяные болота озерно-ледниковых, холмисто-моренных равнин, а также речных пойм (Природа Калининградской области, 2015, С. 59).

В XXI в. наиболее сильные и масштабные торфяные пожары

в Калининградской области отмечались в засушливом 2002 г., затем в 2006 г., когда ими было охвачено 4–7% площади торфяных полей (Исаева и др., 2010). Отмечается, что из всех пожаров на торфяниках за 2000–2010 гг. 74% приходилось на торфоразработки. Большой ущерб в 2002 г. был нанесен и осушенным болотным низинным торфяным почвам на сельскохозяйственных угодьях (Анциферова, 2008, С. 98–129). Несмотря на острую актуальность проблемы торфяных пожаров в Калининградской области, данному вопросу посвящены лишь единичные вышеуказанные публикации. При этом в них напрямую не рассматриваются потери органического углерода. Поэтому в задачи исследования входило:

1. В границах типичного выработанного торфяного месторождения верхового типа изучить строение и запасы органического углерода в остаточных фоновых болотных почвах на участках с потенциальной высокой пожарной опасностью.

2. На примере двух тестовых участков установить глубину осадки поверхности и особенности строения постпирогенных почв в локальных очагах пожаров разной интенсивности (от слабых до сильных).

3. Определить послойные, профильные и площадные потери углерода в зависимости от особенностей пирогенного поражения.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Методология исследований заключается в сочетании профильного метода изучения болотных почв и их пирогенных вариантов с геоботаническими приемами оценки осадки поверхности для решения проблемы пирогенных потерь почвенного органического углерода в зависимости от класса интенсивности торфяного пожара. Степень пирогенной деградации болотных почв связывали с группировкой интенсивности торфяных пожаров по глубине прогорания, использующейся в лесной пирологии и методических указаниях по тушению торфяных пожаров (Рекомендации по тушению, 2020; Залесов, 2021; Способы тушения, 2024).

Исследования проведены в 2024–2025 гг. в пределах выработанного торфяного месторождения “Виттгирренский” площадью 112 га, расположенному в Славском муниципальном округе Калининградской области (рис. 1).

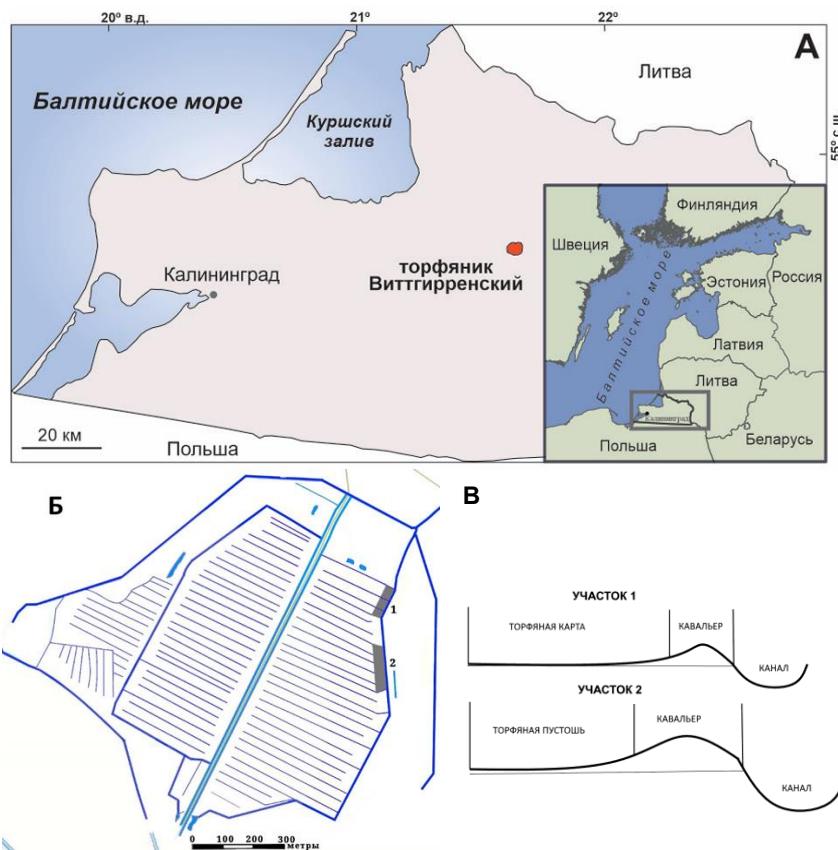


Рис. 1. Местоположение (А), схема открытых каналов осушительной сети (Б) торфяника Виттгирренского с контурами тестовых участков и поперечные профили участков с функциональными зонами (В).

Fig. 1. Location (A), scheme of open channels of the drainage (B) of the Wittgirren peat bog with contours of test sections and cross-sections of sections with functional zones (B).

Территория характеризуется гумидным бореальным климатом Юго-Восточной Прибалтики. По классификации термических режимов почвы относятся к умеренно теплому кратковременно

промерзающему фациальному подтипу (Классификация и диагностика..., 1977). По данным ближайшей к ключевому участку метеостанции (г. Черняховск), среднемноголетние величины составляют: температура воздуха – +7.7 °С, годовое количество осадков – 752 мм (Географический атлас..., 2002). В ландшафтном плане территории располагается на волнистой моренной равнине, в глубоких понижениях которой в голоцене образовались торфяные болота. Подстилающими породами являются озерно-ледниковые и моренные тяжелые суглинки и глины. На торфянике верхового типа “Виттгиренский” (Торфяной фонд, 1952) в XX в. велась промышленная добыча торфа. После ее прекращения в начале 90-х годов XX в. остаточный слой верхового торфа в центральной части составляет 20–40 см, ближе к периферии торфяная залежь начинается с переходных торфов. Окраины заняты низинными торфами. Таким образом, современное почвообразование развивается на неоднородной в пространстве остаточной торфяной залежи.

Осушительная система торfovых работки состоит из регулярной сети мелких карточных каналов, проложенных через 25–40 м, и отводящих воду в крупные каналы на периферии торфяника (рис. 1Б). Закрытый дренаж представлен гофрированными пластиковыми трубками диаметром 10 см. Работа осушительной системы нарушена вследствие механических повреждений. Однако проведенные исследования подтверждают наличие дренажного стока из части водовыпусков (Napreenko et al., 2024). Функционирование осушителей ускоряет потерю влаги из остаточной торфяной залежи. В первую очередь происходит иссушение почв на кавальерах, где в зависимости от погодных условий, начиная с конца мая-июня, складывается пожароопасная ситуация. Первоочередная подверженность кавальеров торфяным пожарам на осущенных болотах отмечается в ряде работ (Сирин и др., 2018; Рекомендации по тушению..., 2020).

В 2021 г. на выработанном торфянике “Виттгиренский” организован карбоновый полигон “Росянка” и начато изучение эмиссии парниковых газов (Карбоновые полигоны, 2025, С. 186–196). При почвенном картографировании выявлен пирогенный ареал в северо-восточной части торфяника (Antsiferova et al.,

2023). В 2011 г. территория подверглась локальным почвенным (торфяным) многоочаговым пожарам разной интенсивности (от слабой до сильной степени сложности). Спустя 14 лет функционирование пирогенно-измененных почв отличается от фоновых прежде всего по гидротермическому режиму. Результаты мониторинга климатически активных газов показывают пиковые значения эмиссии CO₂ именно с постпирогенных участков. Для изучения пирогенных потерь углерода в послепожарном ареале было выделено два тестовых участка (площадью 0.30 и 0.45 га) по принципу различия мощности и состава остаточной торфянной залежи. В пределах участков глубину прогорания и осадку поверхности оценивали отдельно в приканальной части (полоса разравнивания кавальеров) и на прилежащей территории торфяных карт (рис. 1В).

Строение почв устанавливалось в результате закладки разрезов и диагностического бурения с послойным отбором проб каждые 10 см до глубины 200 см. Отбор поверхностных слоев торфа проводили с шагом 1–5 см в зависимости от характера и глубины пирогенного повреждения. Фоновые профили почв описаны на участках, не подвергавшихся пожару в пределах торfovывработки (Antsiferova et al., 2023). Диагностика исходных остаточных болотных почв проведена в соответствии с принципами классификации 1977 г. (Классификация и диагностика..., 1977) и WRB (World Reference Base, 2015). В описании пирогенных образований и пирогенно-измененных почв использованы рекомендации Ф.Р. Зайдельмана (Зайдельман, Шваров, 2002). На пирогенно-измененных почвах заложено по 20 скважин на каждом тестовом участке с послойным отбором проб до глубины минеральной подстилающей породы.

Локализация и площадь открытых участков выгорания определялись с помощью GPS-приемника Garmin Dacota, глубина выгорания – ручным промером линейкой длиной 2 м с разрешением 1 мм. Для выявления подземных полостей использовали металлическую трость с острым наконечником и зондировочный бур. Глубина осадки поверхности на участках подземного и комбинированного (открытого и подземного) горения определялась параллельно двумя методами: а) измерением положения корневой шей-

ки опаленных деревьев над поверхностью почвы с помощью металлической линейки-угольника и складной метровой рейки; б) измерением реликтовых пней сосны, которые в массе захоронены в торфянике при его природной эволюции из переходного в верховой; в результате пожара и гидротермической деградации пни частично выступили на поверхность (рис. 2). Все реликтовые в зоне пожара деревья несут признаки ожога. Первая методика изложена в научных работах и апробирована отечественными учеными (Davies et al., 2013; Сирин и др., 2019). Вторая является местной особенностью, которая повышает информативность первого метода.



Рис. 2. Измерение положения корневой шейки опаленных деревьев и высоты обнажившихся древних пней.
Fig. 2. Measurement of the position of the root collar of scorched trees and the height of exposed ancient stumps.

Лабораторные методы включали анализ зольности торфа путем его сжигания в муфельной печи при температуре 800 °С (ГОСТ 11306-2013), полевой и гигроскопической влажности – термостатно-весовым методом, плотности – методом режущих колец (Вадюнина, Корчагина, 1986), степени разложения торфа – макроскопическим методом по П.Д. Варлыгину (Зайдельман, 2009, С. 123–125). Количественное содержание углерода торфяных почв выполнено методом А. Анстета в модификации В.В. Пономаревой, Т.А. Николаевой (окисление сернохромовой смесью) (Пономарева, Плотникова, 1975), что позволяет избежать неточностей при использовании метода И.В. Тюрина. Потери углерода кг С/м² рассчитывались: 1) для слоев с полным сгоранием торфа – по запасам в аналогичных горизонтах фоновых почв, не подвергавшихся пожару; 2) при частичном сгорании – по разнице в зольности при сравнении с несгоревшими почвами и с учетом апробированных методик (Turetsky, Weider, 2001; Глухова, Сирин, 2018). Статистическая обработка, регрессионный анализ и графическая обработка данных проведены в программе Excel.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На первом этапе исследования установили строение, послойные и общие запасы органического углерода в фоновых почвах, практически не подвергавшихся пирогенному воздействию. Профиль почв представляет собой систему последовательно сменяющихся слоев торфов различного типа (рис. 3). Таким образом, торфяная залежь имеет смешанный характер. После завершения промышленной стадии разработки месторождения наступил период восстановительных сукцессий, сопровождающийся активным действием биологического фактора почвообразования. Современные остаточные торфяные верховые почвы представлены двумя группами: переходные (*Distic Hemic Histosols Drainic*) на участке 1 и обычные на участке 2 (*Fibric Histosols Drainic*).

Различия в строении связаны с разной толщиной остаточной торфяной залежи и повышенной мощностью профиля на кавальерах по сравнению с торфяными картами. В составе верхового торфа преобладает пушицево-сфагновый и сфагновый фускум-торф. Последний и являлся объектом промышленной добычи (Торфяной

фонд, 1952). В стратиграфическом отношении эти слои залегают сверху, сменяясь сосново-пушицевым торфом. Горизонт переходных торфов составляют гипновые и древесно-осоковые виды. На кавальерах встречаются переслаивания верховых и переходных торфов. Низинные торфы представлены преимущественно древесными видами.

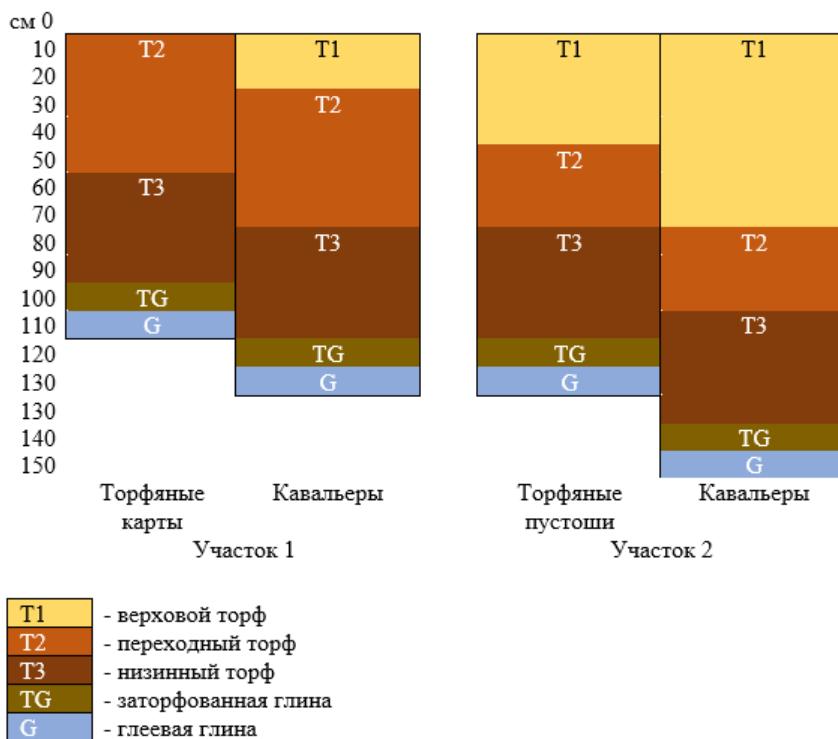


Рис. 3. Строение фоновых почв на торфовыработке.
Fig. 3. Profiles of background soils in cut-over peatland.

Для верховых торфов характерны низкие значения зольности (рис. 4) – 1.53–2.02%, плотности – 0.08–0.11 г/см³ и степени разложения – 13–20%. По всей толще, особенно фускум-торфа, показатели очень слабо варьируют. Переходные виды торфа отли-

чаются также относительно невысокой зольностью (3.5–4.5%) и степенью разложения (25–45%). Верхняя часть низинных древесных торфов имеет зольность 5–11%, несмотря на сильную степень разложения (более 50%). И только в тонком (3–10 см) органоминеральном слое (заторфованная глина) зольность составляет свыше 30%.

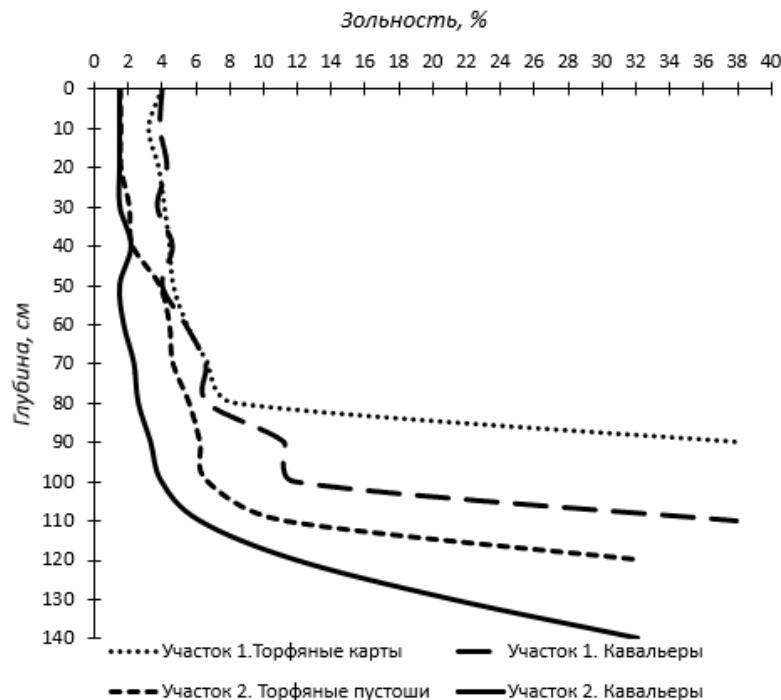


Рис. 4. Зольность фоновых почв на торфовыработке.
Fig. 4. Ash content of background soils in cut-over peatland.

Содержание углерода в органическом веществе торфов варьировало от 50 и 53% в верховых и переходных типах до 54–55% в низинных. Запасы органического углерода в исходных почвах являются необходимым эталоном для оценки пирогенных потерь

этого элемента (табл. 1).

Таблица 1. Послойные и суммарные запасы органического углерода в фоновых почвах, не подвергавшихся пожару

Table 1. Layer-by-layer and total organic carbon reserves in background soils that were not affected by fire

Глубина, см	Болотные переходные почвы. Участок 1		Болотные верховые почвы. Участок 2	
	Торфяные карты	Кавальеры	Торф пустоши	Кавальеры
0–10	6.16 ± 0.11	6.11 ± 0.21	4.70 ± 0.02	4.70 ± 0.04
10–20	6.63 ± 0.11	6.11 ± 0.21	4.70 ± 0.01	4.70 ± 0.04
20–30	7.12 ± 0.09	6.09 ± 0.19	5.19 ± 0.01	5.22 ± 0.02
30–40	6.73 ± 0.08	6.12 ± 0.18	5.70 ± 0.01	5.18 ± 0.02
40–50	7.22 ± 0.03	6.57 ± 0.09	6.12 ± 0.02	5.22 ± 0.02
50–60	8.24 ± 0.04	6.61 ± 0.06	6.71 ± 0.03	5.21 ± 0.02
60–70	8.17 ± 0.08	7.29 ± 0.07	6.70 ± 0.03	6.21 ± 0.02
70–80	8.06 ± 0.08	7.71 ± 0.06	6.63 ± 0.04	6.19 ± 0.03
80–90	8.22 ± 0.09	7.70 ± 0.11	7.09 ± 0.04	6.78 ± 0.04
90–100	10.20 ± 0.21	9.95 ± 0.11	7.56 ± 0.06	7.26 ± 0.05
100–110	–	9.88 ± 0.13	9.97 ± 0.08	7.74 ± 0.05
110–120	–	9.91 ± 0.22	10.85 ± 0.12	7.90 ± 0.06
120–130	–	–	–	9.91 ± 0.06
130–140	–	–	–	11.03 ± 0.09
Суммарно	76.75 ± 0.18	84.04 ± 0.51	81.92 ± 0.16	93.25 ± 0.32

Индивидуальные послойные запасы возрастают по мере перехода от верховых к переходным и далее к низинным типам торфа в связи с увеличением плотности и обогащенности углеродом. Суммарные запасы находятся в прямой зависимости от мощности

торфяного профиля. Величины содержания и запасов углерода типичны для аналогичных болотных почв Европейской части России (Щепаченко и др., 2013; Чернова и др., 2016).

Пожар оказывает на торфяные почвы воздействие в трех вариантах: поверхностное пламенное горение, подземное беспламенное, совместно поверхностное и подземное. Наличие слабо-разложившегося торфа с древесными включениями увеличивает вероятность возникновения пламенного горения (Залесов, 2021, С. 82). Экспериментально установлено, что скорость ветра в 2.5 м/с является оптимальной для развития поверхностного пламенного горения торфа (Гришин, 2006). Однако наиболее длительным во времени и мало зависящим от погодных условий является процесс беспламенного горения (тления). В итоге возникает волнистый и бугристо-западинный постпирогенный рельеф с чередованием участков разной глубины выгорания торфяной залежи и скрытыми подземными пустотами.

Изменение морфологии болотных почв при пирогенной деградации связано с комплексным воздействием пожара на торфяной субстрат по трем направлениям:

- 1) полное сгорание с образованием золы – светло-серой в случае низкозольных торфов и охристой при выгорании низинных торфов (Зайдельман, 2002; Анциферова, 2008);
- 2) неполное сгорание – обугливание с образованием черной сыпучей массы повышенной гидрофобности на месте верхового и переходного торфов и черной зернисто-комковатой непластичной массы в случае низинного высокозольного торфа с исходно сильной степенью разложения;
- 3) термическое воздействие в зонах, прилегающих к очагам горения и тления, но не затронутого ими; выражается в увеличении интенсивности окраски исходного торфа, его степени разложения и зольности по причине ускоренной минерализации.

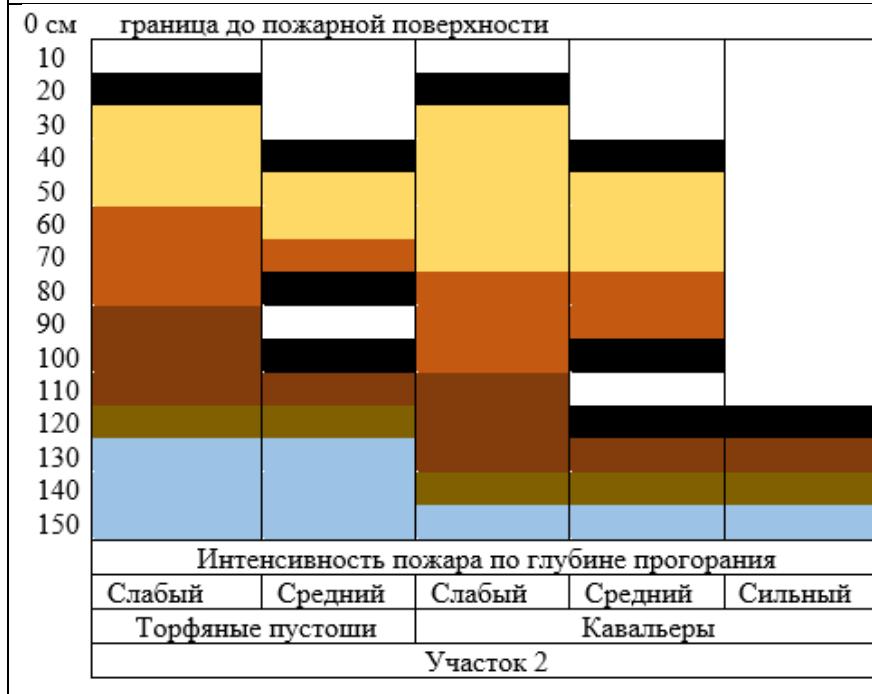
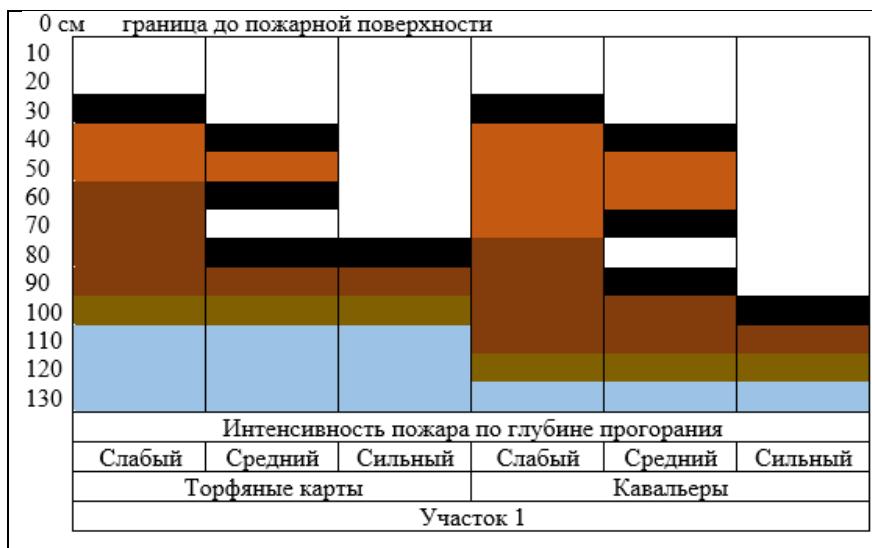
Все вышеуказанное приводит к образованию пространственной и вертикальной контрастности и микромозаичности постпирогенного почвенного покрова, что отмечается многими отечественными и зарубежными исследователями (Сирин, 2019; Ефремова, 2021; Hudspith at el, 2014) и сильно осложняет оценку потерь углерода. Для решения этой проблемы нами разработана и

апробирована методика, позволяющая учитывать локальные особенности и в тоже время вписывающаяся в группировку ландшафтных пожаров. Сущность методики заключается в рассмотрении постпирогенной поверхности как совокупности очагов пожара разной степени интенсивности. Задачей почвенного обследования при этом является установление строения и свойств почв в связи с разной степенью пожара и пирогенной деградации.

Все полевые выборки профилей диагностического бурения с послойным описанием морфологии и анализом свойств разделили по трем степеням интенсивности торфяного пожара и получили обобщенные варианты строения (рис. 5) с учетом данных по осадке поверхности, выполненной геоботаническими методами (табл. 2) и по промерам отрицательных форм микрорельефа пирогенного происхождения (ям, котловин). Морфология профилей соответствует нарастающей степени пирогенной деградации по мере воздействия пожара. В очагах слабых пожаров огнем повреждены лишь поверхностные слои почвы. При пожарах средней степени наблюдаются совместно поверхностное и подземное выгорание. Общая глубина выгорания складывается из осадки поверхности и подземных пустот (каверн). Очаги сильных пожаров диагностируются в понижениях с обрывистыми обугленными бортами. На дне понижений находятся маломощные торфянисто-пирогенные почвы, а при максимальном выгорании – пирогенные образования из углистого слоя, залегающего прямо на минеральной подстилающей породе.

По-видимому, пирогенное воздействие ускорило гидротермическую деградацию и сработку торфяных почв вследствие их термического высушивания и минерализации. Наличие подземных полостей спустя не менее чем 20 лет после пожара показывает, что процесс осадки и уплотнения еще не завершен.

Надо отметить, что метод определения осадки постпирогенной поверхности по положению корневой шейки применим только на лесопокрытых участках, причем с наличием допожарных деревьев “на корню”. Таким условиям соответствуют на участке 1 торфяные карты и частично кавальеры, а на участке 2 – только кавальеры со слабой степенью поражения пожаром.



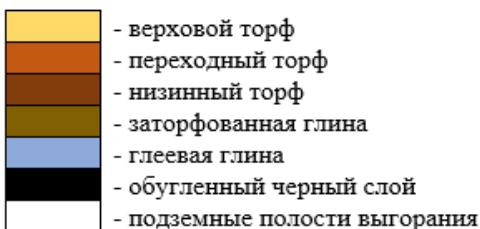


Рис. 5. Строение пирогенно-измененных почв при разной интенсивности торфяных пожаров.

Fig. 5. Structure of pyrogenically altered soils at different intensities of peat fires.

При глубине прогорания свыше 40 см происходит падение деревьев вследствие выгорания торфа, что лишает корни опоры. Поэтому локальные очаги сильных пожаров на тестовом участке 2 маркируются завалами деревьев, обращенных кроной в сторону источника горения в соответствии с классической схемой (Залесов, 2021, С. 82).

Расчет осадки по высоте реликтовых погребенных пней применим для участков их поверхностного размещения в очагах слабого пожара. В ямах выгорания нередко уровень пней ниже современной поверхности. В таких случаях применялся ручной промер глубин.

Как показывают результаты, оба метода дают очень близкие значения при совместном применении и замещают друг друга на участках голого торфа или с редкой послепожарной древесной порослью (на торфяных пустошах участка 2) и при отсутствии пней в слоях верхового торфа (на кавальерах участка 2) (табл. 2). В очагах пожаров средней силы информативность методов несколько снижается по причине асимметрии для разных сторон света по глубинам прогорания в прикорневой зоне, наличия мелких щелей и полостей между корнями, которые замаскированы дерниной. Особенно такие явления характерны для деревьев на кавальерах и вдоль бортов каналов. Тем не менее применение этих методов позволяет восстановить исходный уровень поверхности и внести корректировку в результаты ручных промеров мелких ям

выгорания.

Таблица 2. Осадка поверхности почвы в зонах слабого пожара по результатам промеров корневой шейки деревьев и погребенных пней
Table 2. Soil surface settlement in low-intensity fire zones based on measurements of tree root necks and buried stumps

Высота (см) над современной поверхностью почвы	Участок 1. Торфяные карты			Участок 2. Торфяные пустоши (по пням) и кавальеры (по корневой шейке)		
	n	M ± m	V	n	M ± m	V
Корневой шейки <i>Betula pubescens</i>	174	23.2 ± 0.8	57.2	51	12.3 ± 0.4	51.8
Погребенных пней <i>Pinus sylvestris</i>	82	20.4 ± 0.9	36.8	44	11.5 ± 0.2	25.4

Примечание. n – общая выборка, шт.; M ± m – среднее арифметическое ± ошибка среднего; V – коэффициент вариации, %.

Note. n – total sample, pcs.; M ± m – arithmetic mean ± error of the mean; V – coefficient of variation, %.

Основным недочетом большинства исследований, связанных с оценкой глубины прогорания на постприродных массивах, является игнорирование наличия локальных подземных полостей (каверн) в очагах тления торфа. Одним из решений является зондировка на всю глубину остаточного торфа, что увеличивает трудоемкость работ, но позволяет примерно определить процент площади, содержащей полости или слои золы/обугленного торфа в случае осадки поверхности над полостями.

Для расчета послойных (каждые 10 см) потерь углерода использовали сравнение с аналогичными слоями несгоревших почв (табл. 1). Для слоев обугленного и термически измененного торфа повышенной зольности расчет провели по формуле:

$$\text{ПОУ} = ((\text{Сф} - \text{Сп}) \cdot \text{H} \cdot \text{d}) / 10,$$

где ПОУ – потери органического углерода, кг С/м²; Сф – запасы

углерода в слое х несгоревшей почвы (фоновой); Сп – запасы углерода в слое пирогенно-измененной почвы, соответствующем слою х несгоревшей почвы; Н – толщина слоя, см; d – плотность слоя, г/см³; 10 – коэффициент пересчета на кг С/м².

Путем суммирования послойных запасов получили общие потери для всех вариантов изученных почв на двух участках (табл. 3).

Таблица 3. Суммарные потери органического углерода из торфяных почв при пожарах разной интенсивности

Table 3. Total losses of organic carbon from peat soils during fires of different intensities

Функциональная зона	Интенсивность торфяного пожара по глубине прогорания		
	Слабый	Средний	Сильный
Участок 1			
Торфяные карты	21.20 ± 0.91	36.70 ± 1.88	50.36 ± 3.30
Кавальеры	13.06 ± 1.05	28.43 ± 2.12	63.04 ± 3.51
Участок 2			
Торфяные пустоши	5.41 ± 0.40	24.05 ± 1.33	Очаги отсутствуют
Кавальеры	5.31 ± 1.63	24.53 ± 2.13	65.40 ± 3.22

Регрессионный анализ показал, что существует линейная зависимость потерь углерода из профиля торфяных почв от глубины выгорания (рис. 6).

Следующим шагом явилась экспертная оценка долевого участия очагов пожара разной степени интенсивности в каждой функциональной зоне тестовых участков (рис. 7). Выяснилось, что в наибольшей степени от пожара пострадали кавальеры (прикальвальная полоса), где расположены основные площади сильных пожаров. Напротив, на торфяных картах и особенно пустошах пожар был слабым с отдельными очагами заглубления, преимущественно подземного со стороны кавальеров.

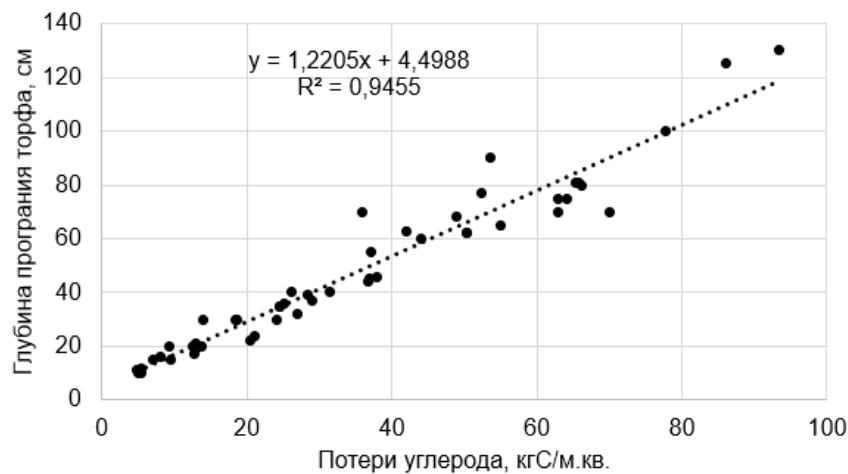


Рис. 6. Диаграмма рассеяния суммарных потерь углерода при различных глубинах выгорания осушенных торфяных почв.

Fig. 6. Scatter diagram of total carbon losses at different depths of peat soil burning.

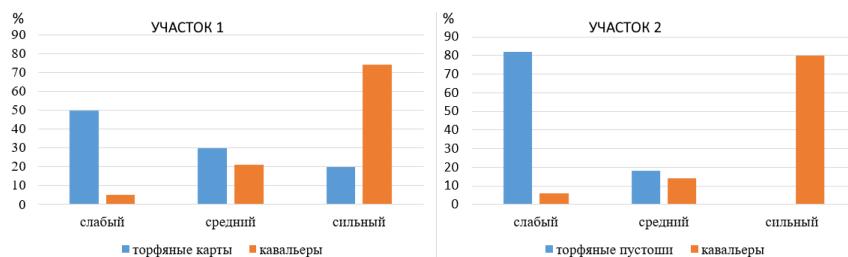


Рис. 7. Долевое участие пожара разной силы по глубине выгорания торфа (% от площади функциональной зоны).

Fig. 7. Share of fires of different intensity in terms of peat burning depth (% of the functional zone area).

Чтобы перейти к площадным потерям углерода необходимо определить вклад разных функциональных зон в общую площадь тестовых участков. На участке 1 кавальеры занимают 28%, а на участке 2 – 36%. Различия зависят от глубины, ширины русла канала и объемов перемещенного из него торфяного грунта. Площадные потери углерода из почв кавальеров составили для участка 1 – 45.3 т С, для участка 2 – 84.7 т С. Таким образом, очаг наиболее интенсивного по глубине пожара пришелся на зону кавальеров участка 2, которые выгорели практически полностью (на 80%) вплоть до минеральной подстилающей породы. Максимальная зафиксированная глубина выгорания составила 160 см. При этом полностью обнажились керамические трубы-коллекторы (диаметром 20–30 см) осушительной системы на протяжении 10–12 м от бровки канала в сторону торфяника. Сильный нагрев привел к трещинам в корпусе труб, а выгорание торфа под ними – к деформации уклона. Мелкие пластиковые гофрированные осушители полностью сгорели в очаге пожара, сохранились лишь частично на периферии в сильно деформированном виде с оплавленными краями. По примерным расчетам, согласно уравнению полного сгорания углерода с образованием CO₂, только в этом очаге при пожаре выделилось $16.8 \cdot 10^4 \text{ м}^3$ газа.

Ряд исследователей отмечает, что наличие в торфяной залежи низкозольных верховых торфов способствует тому, что возгорание начинается при более низких температурах (300 °C) по сравнению с низинными торфами (Смольянинов и др., 1977). Это как раз иллюстрирует ситуацию, позволяющую реконструировать обстановку на торфянике в начальные фазы пожара. На кавальерах участка 2 слой верхового фускум-торфа составлял исходно не менее 70 см. Именно в этой зоне и обнаруживаются очаги максимального выгорания. Однако, достигнув более водонасыщенных слоев торфа на торфяных пустошах, интенсивность пожара резко снизилась. Так сформировалась контрастная картина между глубокими котловинами выгорания в зоне кавальеров, заканчивающимися почти отвесными обугленными бортами по границе с торфяными пустошами. Отдельные очаги подземных пожаров проникли вглубь торфяной залежи по границе переходных торфов и находились в тлеющем состоянии, по-видимому, долгое время.

Реализация такого сценария развития торфяного пожара привела в тому, что на участке 2 вклад потерь углерода из почв кавальеров в пересчете на исследованную площадь составляет 78.2%. На торфяные пустоши приходится 21.8% вследствие поверхностного воздействия пожара. В абсолютных величинах пирогенные потери почвенного углерода с участка 2 площадью 0.42 га составили 108.3 т С.

На участке 1 пожар развивался по другому сценарию. Здесь глубокое выгорание почв на кавальерах сопровождалось распространением пожара на всю площадь торфяных карт. Причина этого – большой периметр кавальеров. Дело в том, что фронт пожара на участке 2 шел только по восточной границе вдоль магистрального канала, так как на изученной части торфяных пустошей нет открытых мелких каналов с карт. Дренажный сток осуществлялся по подземным коллекторам, идущим от концевых частей картовых каналов. На участке 1 в магистральный канал под прямым углом впадают три картовых канала, вдоль бортов которых располагаются полосы невысоких кавальеров. Пожар, прияд со стороны магистрального канала, быстро распространился по сухим почвам кавальеров картовых канав и проник вглубь торфяника. Каждая торфяная карта оказалась со всех сторон окруженной очагами пожаров. Поэтому на участке 1 наблюдалось очень длительное горение, особенно за счет подземного тления. Длина границ пожара по всем кавальерам на участке 1 составляла 134 м, а на участке 2 – 250 м. Такая ситуация привела к высоким потерям углерода из почв торфяных карт участка 1 за счет более глубокого пирогенного поражения. Вклад потерь углерода с кавальеров составил 39.9%, а с торфяных карт – 60.1%. Общие потери с участка 1 площадью 0.3 га оцениваются в 113.4 т С.

Таким образом, показано, что чем гуще сеть открытых осушительных каналов на торфяных почвах, тем больше потери углерода вследствие более быстрого распространения пожара по кавальерам вглубь торфяника.

ВЫВОДЫ

1. Впервые на выработанных торфяных месторождениях Калининградской области (с гумидным климатом бореального

пояса Юго-Восточной Прибалтики) было проведено комплексное изучение пирогенно-измененных почв и оценены потери углерода в результате многоочаговых пожаров. Примененная методология позволила сопоставить степень пирогенной деградации болотных почв с российской классификацией торфяных пожаров по глубине выгорания и логично сгруппировать основные варианты профилей пирогенно-измененных почв по трем классам пожаров от слабого до сильного.

2. Пирогенная деградация почв при слабых пожарах (при глубине выгорания до 25 см) характеризуется уменьшением мощности профиля на 10–20 см вследствие поверхностного воздействия огня с формированием обугленного горизонта. В таких условиях на лесопокрытых участках наиболее эффективно применение метода определения глубины прогорания и послепожарной осадки почвы по положению корневой шейки деревьев с наличием ожога. Потери углерода в очагах слабого пожара варьируют от 5.31 до 21.20 кг С/м² в зависимости от глубины выгорания, исходных запасов углерода, плотности, типа и зольности торфа.

3. При пожаре средней силы (глубина выгорания 25–50 см) пирогенная деградация профиля болотных почв на изученной торфовыработке затрагивает как поверхностные, так и глубокие горизонты, что выражается в уменьшении мощности профиля и формировании полостей подземного выгорания. Потери углерода составляют 24.05– 6.70 кг С/м².

3. В очагах сильного пожара (глубина выгорания свыше 50 см) происходит практически полное уничтожение торфяных верховых и переходных почв с исходной мощностью торфа 100–140 см и образование на их месте сильно укороченных (20–40 см) пирогенных или пирогенно-остаточно-торфянистых почв, которые приурочены к глубоким ямам и котловинам. Потери углерода при этом максимальные и оцениваются в 50.36–65.40 кг С/м².

4. Установлено, что очаги сильных пожаров концентрируются в приканальной полосе разравнивания кавальеров. Повышенная мощность торфяного слоя на кавальерах, сложенных ма-лозольными торфами и их возвышенное положение относительно выработанных торфяных карт приводят к быстрому иссушению почв и их возгоранию под влиянием природных или антропоген-

ных факторов.

5. В распространении фронта пожара большую роль играет густота осушительной сети из мелких картовых каналов. Частое расположение открытых осушителей через 20–40 м на окраинах торфовыработок способствует быстрому проникновению пожара вдоль кавальеров вглубь торфяных карт, заглублению огня и длительному последующему тлению с образованием мелких подземных полостей выгорания. При этом потери углерода с площади торфяных карт превышают потери с кавальеров. В случае, когда фронт пожара после захвата кавальеров выходит на площадь без открытых каналов (только с подземными осушителями и более сырой торфяной залежью) интенсивность горения, по-видимому, ослабевает. Основные потери углерода при таком сценарии связаны с выгоранием почв на кавальерах, а на торфяных картах пожар оценивается как слабый по глубине прогорания.

6. Использованная методика на основе оценки пирогенной деградации почв и по группам интенсивности торфяных пожаров может быть применена для разнообразных ландшафтных условий, что позволит выработать региональные и общие шкалы пирогенных потерь углерода в зависимости от исходного типа торфа, глубины выгорания с учетом специфики способа осушения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анциферова О.А. Почвы Замландского полуострова и их антропогенное изменение. Часть 2. Дерново-глеевые, аллювиальные, болотные, постпланировочные, городские почвы. Структура почвенного покрова. Калининград: Изд-во ФГБОУ ВПО “КГТУ”. 2008. 424 с.
2. Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А. Методы исследования физических свойств почв. М.: Агропромиздат. 1986. 415 с.
3. Географический атлас Калининградской области / Гл. ред. В.В. Орленок. Калининград: Изд-во КГУ. 2002. 276 с.
4. Глухова Т.В., Сирин А.А. Потери почвенного углерода при пожаре на осушеннем лесном верховом болоте // Почвоведение. 2018. № 5. С. 580–588. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0032180X18050076>.
5. ГОСТ 11306. Торф и продукты его переработки. Методы определения зольности. М.: Россстандарт, 2013. 8 с.

6. Гришин А.М., Голованов А.Н., Суков Я.В., Прейс Ю.И. Экспериментальное исследование процессов зажигания и горения торфа // Инженерно-физический журнал. 2006. Т. 79. № 3. С. 137–142.
7. Ефремова Т.Т., Пименов А.В., Ефремов С.П., Аврова А.Ф. Постпирогенная мозаичность физико-химических свойств и потеря углерода в лесных почвах заболоченной долины Кузнецкого Алатау // Сибирский лесной журнал. 2021. № 6. С. 18–29. DOI: <https://doi.org/10.15372/SJFS20210602>.
8. Зайдельман Ф.Р. Методы экологомелиоративных изысканий и исследований почв. М.: КолосС. 2008. 486 с.
9. Зайдельман Ф.Р., Романов С.В. Экологогидротермическая оценка пирогенных почв выработанных торфяных месторождений // Почловедение. 2007. № 1. С. 93–105.
10. Зайдельман Ф.Р., Шваров А.П. Пирогенная и гидротермическая деградация торфяных почв, их агрэкология, песчаные культуры земледелия, рекультивация. М.: Изд-во МГУ. 2002. 168 с.
11. Залесов С.В. Лесная пирология. Екатеринбург: УГЛТУ, 2021. 396 с.
12. Исаева Л.К., Наместникова О.В., Соловьёв С.В., Сулименко В.А., Шилин С.А. Пожарная и экологическая опасность торфяников // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2010. № 3. С. 29–35.
13. Калининградская область. Географический атлас / Гл. ред. В. Орленок, Г. Федоров. Калининград: Мастерская “Коллекция”, 2011. 96 с.
14. Карбоновые полигоны: мониторинг, геоинформационные системы, секвестрационные технологии / Под ред. С.К. Гулева, А.В. Ольчева. М.: Научный мир, 2025. 420 с.
15. Классификация и диагностика почв СССР / Сост. В.В. Егоров, В.М. Фриланд, Е.Н. Иванова, Н.Н. Розов. М.: Колос, 1977. 224 с.
16. Конюшков Д.Е., Ананко Т.В., Герасимова М.И., Савицкая Н.В., Чуванов С.В. Анализ почвенного покрова России по карте масштаба 1:2.5 млн с использованием новой классификации: отделы почв и их площади // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2022. Вып. 112. С. 73–121. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2022-112-73-121>.
17. Курбатский Н.П. Техника и тактика тушения лесных пожаров. М.: Гослесбумиздат, 1962. 154 с.
18. Медведева М.А., Иткин В.Ю., Сирин А.А. Анализ показателей температурных аномалий для выявления торфяных пожаров // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 6. С. 92–116. DOI: <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2023-20-6-92-116>.

19. Методика тушения ландшафтных пожаров (утв. МЧС 14 сентября 2015 г. N 2-4-87-32-ЛБ). М., 2015. 48 с.
20. *Мокряк А.В., Парижская А.Ю.* Проблемы тлеющих торфяных пожаров в лесах и Арктике // Международный научно-исследовательский журнал. 2021. № 10. С. 159–162. DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.112.10.027>.
21. *Пономарева В.В., Плотникова Т.А.* Методические указания по определению содержания и состава гумуса в почвах (минеральных и торфяных). Л.: Изд-во ВАСХНИЛ, 1975. 105 с.
22. Природа Калининградской области. Водные объекты (Балтийское море, лагуны, болота). Справочное пособие / Сост. В.А. Медведев, Ф.Е. Алексеев. Калининград: Исток, 2015. 104 с.
23. Рекомендации по тушению осушенных торфяных болот / Г.В. Куксин, М.Л. Крейндин, Ю.Б. Петренко и др. М.: ФАУ ДПО ВИПКЛХ, 2020. 109 с.
24. *Сирин А.А., Макаров Д.А., Гуммерт И., Маслов А.А., Гульбе Я.И.* Глубина прогорания торфа и потери углерода при лесном подземном пожаре // Лесоведение. 2019. № 5. С. 410–422. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0024114819050097>.
25. *Смольянинов С.И., Белихмайер А.Я., Икрин В.М.* Кинетика газовыделения при термическом разложении торфа // Известия Томского политехнического института. 1977. Т. 300. С. 13–15.
26. Способы тушения торфяных пожаров / С.В. Залесов, Г.В. Куксин, И.М. Секерин. Екатеринбург: УГЛТУ, 2024. 89 с.
27. Торф: возгорание торфа, тушение торфяников и торфокомпозиты / Л.Б. Хорошавин, О.А. Медведев, В.А. Беляков и др. М.: ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2013. 256 с.
28. Торфяной фонд Калининградской области / Отв. ред. А.С. Оленин. М., 1952. 100 с.
29. *Чернова О.В., Рыжкова И.М., Подвезенная М.А.* Опыт региональной оценки изменений запасов углерода в почвах южной тайги и лесостепи за исторический период // Почвоведение. 2016. № 8. С. 1013–1028.
30. *Щепащенко Д.Г., Мухортова Л.В., Швиденко А.З., Ведрова Э.Ф.* Запасы органического углерода в почвах России // Почвоведение. 2013. № 2. С. 123–132.
31. *Antsiferova O., Napreenko M.; Napreenko-Dorokhova T.* Transformation of Soils and Mire Community Reestablishment Potential in Disturbed Abandoned Peatland: A Case Study from the Kaliningrad Region, Russia // Land. 2023. No. 12. Vol. 1880. DOI: <https://doi.org/10.3390/land12101880>.
32. *Che Azmi N.A., Mohd Apandi N.A., Rashid A.S.* Carbon emissions from the peat fire problem – a review // Environ Sci Pollut Res. 2021. Vol. 28. P. 16948–16961. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-021-12886-x>.

33. Davies G.M., Gray A., Rein G., Legg C.J. Peat consumption and carbon loss due to smouldering wildfire in a temperate peatland // Forest Ecology and Management. 2013. Vol. 308. P. 169–177.
34. Hudspith V.A., Belcher C.M., Yearsley J.M. Charring temperatures are driven by the fuel types burned in a peatland wildfire // Front. Plant Sci. 2014. Vol. 5. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00714>.
35. Napreenko M., Kilesa A., Napreenko-Dorokhova T., Antsiferova O., Bashirova L., Goltsvert G. Carbon flux inventories on disturbed peatlands as part of the Carbon Supersite Programme in the Baltic Region // Int. J. Environ. Sci. Technol. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13762-024-06200-8>.
36. Poulter B., Christensen N.L., Halpin P.N. Carbon emissions from a temperate peat fire and its relevance to interannual variability of trace atmospheric greenhouse gases // J. Geophys. Res. 2006. Vol. 111. Iss. 6. P. 11.
37. Reddy A.D., Hawbaker T.J., Wurster F., Zhua Z., Ward S., Newcombd D., Murray R. Quantifying soil carbon loss and uncertainty from a peatland wildfire using multi-temporal // Remote Sensing of Environment. 2015. Vol. 170. P. 306–316.
38. Rein G., Huang X. Smouldering wildfires in peatlands, forests and the arctic: Challenges and perspectives // Current Opinion in Environmental Science & Health. 2021. Vol. 24. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2021.100296>.
39. Schmidt A., Ellsworth L.M., Boisen G.A., Novita N., Malik A., Gangga A., Albar I., Dwi Nurhayati A., Putra R.R., Asyhari A. and Kauffman J.B. Fire frequency, intensity, and burn severity in Kalimantan's threatened Peatland areas over two Decades // Front. For. Glob. Change. 2024 Vol. 7. DOI: <https://doi.org/10.3389/ffgc.2024.1221797>.
40. Sirin, A., Maslov A., Makarov D., Gulbe Y., Joosten H. Assessing Wood and Soil Carbon Losses from a Forest-Peat Fire in the Boreo-Nemoral Zone // Forests. 2021. No. 12. Vol. 880. DOI: <https://doi.org/10.3390/f12070880>.
41. Turetsky M.R., Benscoter B., Page S., Rein G., van der Werf G.R., Watts A. Global vulnerability of peatlands to fire and carbon loss // Nature Geoscience. 2015. Vol. 8(1). P. 11–14. DOI: <https://doi.org/10.1038/ngeo2325>.
42. Turetsky M.R., Wieder R.K. A direct approach to quantifying organic matter lost as a result of peatland wildfire // Can. J. Forest Res. 2001. Vol. 31. P. 363–366. DOI: <https://doi.org/10.1139/cjfr-31-2-363>.
43. Wilkinson S.L., Andersen R., Moore P.A., Davidson S.J., Granath G., Waddington J.M. Wildfire and degradation accelerate northern peatland carbon release // Nat. Clim. Chang. 2023. Vol. 13. P. 456–460. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41558-023-01657-w>.
44. World reference base for soil resources 2014 International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps /

Anjos L., Gaistardo C., Deckers J., Dondene S., Eberhardt E., Gerasimova M., Harms B., Jones A., Krasilnikov P., Reinsch T., Vargas R., Zhang G. Ed. Schad P., Van Huyssteen C., Micheli E. Rome (Italy). FAO. 2015. 192 p.

REFERENCES

1. Antsiferova O.A., *Pochvy Zamlandskogo poluostrova i ikh antropogennoye izmeneniye. Chast' 2. Dernovo-gleyevyye, allyuvial'nyye, bolotnyye, postplanirovochnyye, gorodskiye pochvy. Struktura pochvennogo pokrova* (Soils of the Samland Peninsula and their anthropogenic change. Part 2. Sod-gley, alluvial, bog, post-planning, urban soils. Soil cover structure), Kaliningrad: Izd-vo FGBOU VPO "KGTU", 2008, 424 p.
2. Vadyunina A.F., Korshagina Z.A., *Metody issledovaniya fizicheskikh svoystv pochv* (Methods for studying the physical properties of soils), Moscow: Agropromizdat, 1986, 415 p.
3. Orlyonok V.V. (Ed.), *Geograficheskiy atlas Kaliningradskoy oblasti* (Geographical atlas of the Kaliningrad region), Kaliningrad: Izd-vo KGU, 2002, 276 p.
4. Glukhova T.V., Sirin A.A., *Poteri pochvennogo ugleroda pri pozhare na osushennom lesnom verkhovom bolote* (Losses of soil carbon during a fire in a drained forested raised bog), *Pochvovedeniye*, 2018, No. 5, pp. 580–588, DOI: <https://doi.org/10.7868/S0032180X18050076>.
5. *GOST 11306. Torf i produkty ego pererabotki. Metody opredeleniya zol'nosti* (State standard of the Russian Federation 11306. Peat and its processed products. Methods for determining ash content), Moscow, Rosstandart, 2013, 8 p.
6. Grishin A.M., Golovanov A.N., Sukov Ya.V., Preys Yu.I., *Eksperimental'noye issledovaniye protsessov zazhiganiya i goreniya torfa* (Experimental study of peat ignition and combustion processes), *Inzhenernofizicheskiy zhurnal*, 2006, Vol. 79, No. 3, pp. 137–142.
7. Efremova T.T., Pimenov A.V., Efremov S.P., Avrova A.F., *Postpirogennaya mozaichnost' fiziko-khimicheskikh svoystv i poter' ugleroda v lesnykh pochvakh zabolochennoy doliny Kuznetskogo Alatau* (Post-pyrogenic mosaicism of physicochemical properties and carbon losses in forest soils of the swampy valley of the Kuznetsk Alatau), *Sibirskiy lesnoy zhurnal*, 2021, No. 6, pp. 18–29, DOI: <https://doi.org/10.15372/SJFS20210602>.
8. Zaydel'man F.R., *Metody ekologo-meliorativnykh izyskaniy i issledovaniy pochv* (Methods of ecological and meliorative surveys and soil studies), Moscow: KolosS, 2008, 486 p.
9. Zaydel'man F.R., Romanov S.V., *Ekologo-gidrotermicheskaya otsenka*

- pirogennykh pochv vyrabotannykh torfyanykh mestorozhdeniy (Ecological and hydrothermal assessment of pyrogenic soils of developed peat deposits), *Pochvovedeniye*, 2007, No. 1, pp. 93–105.
10. Zaydel'man F.R., Shvarov A.P., *Pirogennaya i gidrotermicheskaya degradatsiya torfyanykh pochv, ikh agroekologiya, peschanye kul'tury zemledeliya, rekul'tivatsiya* (Pyrogenic and hydrothermal degradation of peat soils, their agroecology, sandy crops of agriculture, reclamation), Moscow: Izd-vo MGU, 2002, 168 p.
11. Zalesov S.V., *Lesnaya pirologiya* (Forest pyrology), Ekaterinburg: UGLTU, 396 p.
12. Isaeva L.K., Namestnikova O.V., Solovyov S.V., Sulimenko V.A., Shilin S.A., Pozharnaya i ekologicheskaya opasnost' torfyanikov (Fire and environmental hazards of peatlands), *Pozhary i chrezychaynyye situatsii: predotvratshcheniye, likvidatsiya*, 2010, No. 3, pp. 29–35.
13. Olenok V., Fedorov G. (Ed.), *Kaliningradskaya oblast', Geograficheskiy atlas* (Kaliningrad Region. Geographical Atlas), Kaliningrad: Masterskaya "Kollektsiya", 2011, 96 p.
14. Guleva S.K., Ol'cheva A.V. (Ed.), *Karbonovyye poligony: monitoring, geoinformatsionnyye sistemy, sekvestratsionnyye tekhnologii* (Carbon polygons: monitoring, geoinformation systems, sequestration technologies), Moscow: Nauchnyy mir, 2025, 420 p.
15. Egorov V.V., Fridland V.M., Ivanova E.N., Rozov N.N., *Klassifikaciâ i diagnostika počv SSSR* (Classification and diagnostics of soils of the USSR), Moscow: Kolos, 1977, 224 p.
16. Konyushkov D.E., Ananko T.V., Gerasimova M.I., Savitskaya N.V., Chuvanov S.V., Soil orders and their areas on the updated soil map of the Russian Federation, 1 : 2.5 M scale, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2022, Vol. 112, pp. 73–121, DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2022-112-73-121>.
17. Kurbatskiy N.P., *Tekhnika i taktika tusheniya lesnykh pozharov* (Technique and tactics of extinguishing forest fires), Moscow: Goslesbumizdat, 1962, 154 p.
18. Medvedeva M.A., Itkin V.Yu., Sirin A.A., Analiz pokazateley temperaturnykh anomalij dlya vyavleniya torfyanykh pozharov (Analysis of temperature anomaly indicators for detecting peat fires), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, Vol. 20, No. 6, pp. 92–116, DOI: <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2023-20-6-92-116>.
19. *Metodika tusheniya landscapeykh pozharov* (Methodology for extinguishing landscape fires) (approved by the Ministry of Emergency Situations on September 14, 2015 No. 2-4-87-32-LB), Moscow, 2015, 48 p.
20. Mokryak A.V., Pariyskaya A.Yu., Problemy tleyushchikh torfyanykh pozharov v lesakh i Arktike (Problems of smoldering peat fires in forests and

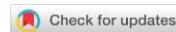
- the Arctic), *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal*, 2021, No. 10, pp. 159–162, DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.112.10.027>.
21. Ponomareva V.V., Plotnikova T.A., *Metodicheskiye ukazaniya po opredeleniyu soderzhaniya i sostava gumusa v pochvakh (mineral'nykh i torfyanykh)* (Methodical instructions for determining the content and composition of humus in soils (mineral and peat)), Leningrad: Izd-vo VASKHNIL, 1975, 105 p.
22. Medvedev V.A., Alekseyev F.Ye. (compilation), *Priroda Kaliningradskoy oblasti. Vodnyye ob'yekty (Baltiyskoye more, laguny, bolota). Spravochnoye posobiye* (Nature of the Kaliningrad Region. Water Bodies (the Baltic Sea, Lagoons, Marshes). Reference Manual), Kaliningrad: Istok, 2015, 104 p.
23. Kuksin G.V., Kreydin M.L., Petrenko Yu.B. et al., *Rekomendatsii po tusheniyu torfyanykh bolot* (Recommendations for extinguishing drained peat bogs), Moscow: FAU DPO VIPKLH, 2020, 109 p.
24. Sirin A.A., Makarov D.A., Gummert I., Maslov A.A., Gul'be Ya.I., Glubina progoraniya torfa i poteri ugleroda pri lesnom podzemnom pozhare (Depth of peat combustion and carbon losses during underground forest fire), *Lesovedenie*, 2019, No. 5, pp. 410–422, DOI: <https://doi.org/10.1134/S0024114819050097>.
25. Smol'yaninov S.I., Belikhmayyer A.Ya., Ikrin V.M., *Kinetika gazovydeleniya pri termicheskem razlozhenii torfa* (Kinetics of gas evolution during thermal decomposition of peat), *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo instituta*, 1977, Vol. 300, pp. 13–15.
26. Zalesov S.V., Kuksin G.V., Sekerin I.M. *Sposoby tusheniya torfyanykh pozharov* (Methods of extinguishing peat fires), Ekaterinburg: UGLTU, 2024, 89 p.
27. Khoroshavin L.B., Medvedev O.A., Belyakov V.A., *Torf: vozgoraniye torfa, tusheniye torfyanikov i torfokompozity* (Peat: peat fires, peatland fire extinguishing and peat composites), EMERCOM of Russia, Moscow: FGBU VNII GOCHS (FTS), 2013, 256 p.
28. Olenin A.S., *Torfyany fond Kaliningradskoy oblasti* (The Peat Stock Cadastre of the Kaliningrad Region), Moscow, 1952, 100 p.
29. Chernova O.V., Ryzhova I.M., Podvezennaya M.A., Opyt regional'noy otsenki izmeneniy zapasov ugleroda v pochvakh yuzhnay taygi i lesostepi za istoricheskiy period (Experience of regional assessment of changes in carbon reserves in soils of the southern taiga and forest-steppe over the historical period), *Pochvovedeniye*, 2016, No. 8, pp. 1013–1028.
30. Shchepashchenko D.G., Mukhortova L.V., Shvidenko A.Z., Vedrova E.F., *Zapasy organicheskogo ugleroda v pochvakh Rossii* (Organic carbon reserves in soils of Russia), *Pochvovedeniye*, 2013, No. 2, pp. 123–132.
31. Antsiferova O., Napreenko M.; Napreenko-Dorokhova T., Transformation

- of Soils and Mire Community Reestablishment Potential in Disturbed Abandoned Peatland: A Case Study from the Kaliningrad Region, Russia, *Land*, 2023, No. 12, Vol. 1880, DOI: <https://doi.org/10.3390/land12101880>.
32. Che Azmi N.A., Mohd Apandi N.A., Rashid A.S., Carbon emissions from the peat fire problem – a review, *Environ Sci Pollut Res*, 2021, Vol. 28, pp. 16948–16961, DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-021-12886-x>.
33. Davies G.M., Gray A., Rein G., Legg C.J., Peat consumption and carbon loss due to smouldering wildfire in a temperate peatland, *Forest Ecology and Management*, 2013, Vol. 308, pp. 169–177.
34. Hudspith V.A., Belcher C.M., Yearsley J.M., Charring temperatures are driven by the fuel types burned in a peatland wildfire, *Front. Plant Sci.*, 2014, Vol. 5, DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00714>.
35. Napreenko M., Kileso A., Napreenko-Dorokhova T., Antsiferova O., Bashirova L., Goltsvert G., Carbon flux inventories on disturbed peatlands as part of the Carbon Supersite Programme in the Baltic Region, *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, 2024, DOI: <https://doi.org/10.1007/s13762-024-06200-8>.
36. Poulter B., Christensen N.L., Halpin P.N., Carbon emissions from a temperate peat fire and its relevance to interannual variability of trace atmospheric greenhouse gases, *Journal Geophys. Res.*, 2006, Vol. 111, Iss. 6, pp. 11.
37. Reddy A.D., Hawbaker T.J., Wurster F., Zhua Z., Ward S., Newcombd D., Murray R., Quantifying soil carbon loss and uncertainty from a peatland wildfire using multi-temporal, *Remote Sensing of Environment*, 2015, Vol. 170, pp. 306–316.
38. Rein G., Huang X., Smouldering wildfires in peatlands, forests and the arctic: Challenges and perspectives, *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 2021, Vol. 24, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2021.100296>.
39. Schmidt A., Ellsworth L.M., Boisen G.A., Novita N., Malik A., Gangga A., Albar I., Dwi Nurhayati A., Putra R.R., Asyhari A., Kauffman J.B., Fire frequency, intensity, and burn severity in Kalimantan's threatened Peatland areas over two Decades, *Front. For. Glob. Change*, 2024, Vol. 7, DOI: <https://doi.org/10.3389/ffgc.2024.1221797>.
40. Sirin A., Maslov A., Makarov D., Gulbe Y., Joosten H., Assessing Wood and Soil Carbon Losses from a Forest-Peat Fire in the Boreo-Nemoral Zone, *Forests*, 2021, No. 12, Vol. 880, DOI: <https://doi.org/10.3390/f12070880>.
41. Turetsky M.R., Benscoter B., Page S., Rein G., van der Werf G.R., Watts A., Global vulnerability of peatlands to fire and carbon loss, *Nature Geoscience*, 2015, Vol. 8(1), pp. 11–14, DOI: <https://doi.org/10.1038/ngeo2325>.
42. Turetsky M.R., Wieder R.K., A direct approach to quantifying organic

matter lost as a result of peatland wildfire, *Can. J. Forest Res.*, 2001, Vol. 31, pp. 363–366, DOI: <https://doi.org/10.1139/cjfr-31-2-363>.

43. Wilkinson S.L., Andersen R., Moore P.A., Davidson S.J., Granath G., Waddington J.M., Wildfire and degradation accelerate northern peatland carbon release, *Nat. Clim. Chang.*, 2023, Vol. 13, pp. 456–460, DOI: <https://doi.org/10.1038/s41558-023-01657-w>.

44. *World reference base for soil resources 2014 International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps*, Anjos L., Gaistardo C., Deckers J., Dondeyne S., Eberhardt E., Gerasimova M., Harms B., Jones A., Krasilnikov P., Reinsch T., Vargas R., Zhang G. (Ed.), Schad P., Van Huyssteen C., Micheli E. Rome (Italy), FAO, 2015, 192 p.



Ссылки для цитирования:

Коба В.П., Новицкий М.Л., Пшеничников Н.А., Нагорняк А.А. Почвенные условия биоценозов *Quercus pubescens* Willd. Южного берега Крыма // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2025. Вып. 125. С. 111-137. DOI: 10.19047/0136-1694-2025-125-111-137

Cite this article as:

Koba V.P., Novitsky M.L., Pshenichnikov N.A., Nagornyak A.A., Soil conditions of biocenoses *Quercus pubescens* Willd. of the Southern coast of Crimea, Dokuchaev Soil Bulletin, 2025, V. 125, pp. 111-137, DOI: 10.19047/0136-1694-2025-125-111-137

Почвенные условия биоценозов *Quercus pubescens* Willd. Южного берега Крыма

© 2025 г. В. П. Коба, М. Л. Новицкий*,
Н. А. Пшеничников, А. А. Нагорняк

Никитский ботанический сад – Национальный научный центр РАН,
298648, Республика Крым, Россия,
г. Ялта, пгт Никита, Никитский спуск, 52,
*e-mail: maxim.novickiy@bk.ru.

Поступила в редакцию 11.11.2024, принята к публикации 16.09.2025

Резюме: Исследования проводили в биоценозах *Q. pubescens* Южного берега Крыма. В западной, центральной и восточной частях исследуемого района было заложено 6 пробных площадей. Основная часть почв представлена коричневыми слабомощными на элювии известняков и глинистых сланцев, на “Мыс Мартыян” – коричневыми красноцветными (*terra rossa*), сформировавшимися на мощном слое выщелоченных продуктов выветривания верхнеюрских известняков. В почвах изучали структуру и состав фитоценоза, таксационные характеристики насаждений, особенности почвенных условий. Выявлено, что наиболее жесткие условия по характеристике качества почвенной среды в настоящее время складываются в западной части произрастания *Q. pubescens* на Южном берегу Крыма. В насаждениях Ласпи и Кастрополя самый низкий уровень концентрации гумуса и содержания влаги в почве. В центральной части массива лесов *Q. pubescens*, при некотором улучшении почвенных условий, общая

специфика изменения качества почвенной среды весьма близка к насаждениям западных территорий. Установлено, что рост и развитие древостоев *Q. pubescens* мыса Ай-Тодор в значительной степени определяются сезонной динамикой увлажненности почвы. Сравнительно высокое содержание влаги в почве в первые месяцы вегетации положительно влияет на рост *Q. pubescens*; резкое ее снижение во второй половине лета до значений, близких к показателям биоценозов западной части, оказывает стрессовое действие на состояние древостоев на мысе Ай-Тодор. В восточной части Южного берега Крыма на почвенные условия в биоценозах *Q. pubescens* значительное действие оказывает подстилающий грунт. Габбро-диабаз лакколитов Аю-Даг и Кастель влияет на кислотность почвы, особенности формирования и накопления гумуса. Показано, что плотные слои габбро-диабаза повышают влагообеспечение древостоев *Q. pubescens* в экотопах г. Аю-Даг и Кастель. Сделан вывод, что тотальная вырубка в прошлом коренных древостоев *Q. pubescens* Южного берега Крыма определила глубокую деградацию структуры и состава растительных сообществ, формирование на данных территориях низкопродуктивных порослевых насаждений. Одной из причин деструктивных явлений в развитии биоценозов *Q. pubescens* является изменение водного баланса почвенной среды. Возможности роста порослевых насаждений *Q. pubescens* Южного берега Крыма в настоящее время обеспечиваются мощной корневой системой материнского древостоя, которая продолжает еще функционировать.

Ключевые слова: terra rossa; коричневые почвы; биоценоз; древостой; почва; гранулометрический состав; гумус; влажность.

Soil conditions of biocenoses *Quercus pubescens* Willd. of the Southern coast of Crimea

© 2025 V. P. Koba, M. L. Novitsky^{*},
N. A. Pshenichnikov, A. A. Nagornyak

Nikitsky Botanical Garden – National Scientific Center
of the Russian Academy of Sciences,
52 Nikitsky descent, Nikita urban settlement, Yalta 298648,
Republic of Crimea, Russian Federation,
^{*} e-mail: maxim.novickiy@bk.ru.

Received 11.11.2024, Accepted 16.09.2025

Abstract: The study was conducted in the biocenoses of *Quercus pubescens* on the Southern Coast of Crimea. Six sample plots were established in the western, central, and eastern parts of the study area. The soils are predominantly brown, weakly developed on eluvium-deluvium of limestones and clay shales, while at “Cape Martyan” they are brown reddish-brown soils (Terra Rossa) formed on a thick layer of leached weathering products of Upper Jurassic limestones. The study examined the structure and composition of the phytocenosis, taxation characteristics of the stands, and specific soil conditions. It was revealed that the most stringent conditions for the characteristics of the quality of the soil environment are currently developing in the western part of *Q. pubescens* growth on the Southern Coast of Crimea. The soil under Laspi and Kastropol plantings have the lowest humus concentration and moisture content. In the central part of the *Q. pubescens* forest, with some improvement in soil conditions, the general specificity of changes in the quality of the soil environment is very close to the plantings of the western territories. It was found that the growth and development of *Q. pubescens* stands on Cape Ai-Todor are largely determined by the seasonal dynamics of soil moisture. The relatively high moisture content in the soil during the first months of vegetation has a positive effect on the growth of *Q. pubescens*; and its sharp decrease in the second half of summer to values, close to the indicators of the biocenoses of the western part, shows a stressful effect on the condition of the forest stands on Cape Ai-Todor. In the eastern part of *Q. pubescens* habitat on the Southern Coast of Crimea, the underlying bedrock has a significant effect on soil conditions. Gabbro-diabase of the Ayu-Dag and Kastel laccoliths affects soil acidity, features of humus formation and accumulation. It is shown that dense gabbro-diabase layers increase moisture supply of *Q. pubescens* stands in the Ayu-Dag and Kastel ecotopes. It is concluded that the total cutting of primary *Q. pubescens* stands on the Southern Coast of Crimea in the past determined the deep degradation of the structure and composition of plant communities, the formation of low-productivity coppice plantations in these areas. One of the causes of destructive phenomena in the development of *Q. pubescens* biocenoses is a change in the water balance of the soil environment. The growth potential of *Q. pubescens* coppice stands on the Southern Coast of Crimea is currently provided by the powerful root system of the parent tree stand, which continues to function.

Keywords: terra rossa; brown soils; biocenosis; forest stand; soil; granulometric composition; humus, humidity.

ВВЕДЕНИЕ

Quercus pubescens Willd. – вид с широким ареалом, встреча-

ется по всему европейскому континенту от Португалии до Ливана и от России до Южной Германии (Bocharnikov, 2021; Chrtek, 1984; Debussche et al., 2001). Произрастает на равнинах и горах до высоты 1 400 м во Франции, в южной и восточной Европе до 1 700 м над уровнем моря. Встречается на сланцах, мергелях, песках, илах и известковых участках. При произрастании на глубоких аллювиальных почвах *Q. pubescens* может достигать значительных размеров и возрастных показателей (Santonja et al., 2022; Wellstein et al., 2015). *Q. pubescens* плохо растет на переувлажненных почвах, проявляет высокую устойчивость к действию водного дефицита, к низкой влажности грунта в засушливых летних условиях, это обеспечивает успешное его произрастание в горах Центрального массива во Франции, на юге Балкан и Пиренейском полуострове (Santonja et al., 2022; Facioni et al., 2015; Ripullone et al., 2020). На протяжении всего плейстоценового оледенения средиземноморские виды рода *Quercus* L. часто произрастали в пределах экологических убежищ. В последующем в результате постоянной вырубки насаждений *Q. pubescens* произошла фрагментация его природного ареала. В настоящее время в Средиземноморье в результате частых рубок большая часть насаждений представлена порослевыми многоствольными деревьями *Q. pubescens* 3-ей и 4-ой генерации (Arend et al., 2011; Berta et al., 2019).

На полуострове основной массив лесов *Q. pubescens* распространен в приморской части южного макросклона Главной гряды Крымских гор (Плугатарь и др., 2022). Здесь *Q. pubescens* произрастает на высотах от 20 до 450–500 м над уровнем моря. Большая часть его насаждений представлена низкопродуктивными древостоями порослевого происхождения. Нерациональная хозяйственная деятельность, проведение интенсивных рубок в прошлом определили снижение экологической устойчивости древостояев *Q. pubescens*, большую их повреждаемость вредителями и болезнями. В настоящее время антропогенно обусловленные деструктивные явления наиболее масштабно проявляются в насаждениях *Q. pubescens* Южного берега Крыма, территория которого характеризуется высокой плотностью селитебных объектов и интенсивным развитием курортно-рекреационной деятельности. Для повышения устойчивости и сохранения природных популяций

Q. pubescens Крыма необходимо формирование системы мероприятий по восстановлению их биоэкологического потенциала, требуется организация мониторинга и разработка методов их эффективного семенного воспроизведения. Важнейшей задачей в решении данных проблем является оценка условий произрастания, анализ эдафических факторов в биоценозах *Q. pubescens*.

Целью исследований являлось изучение особенностей почвенной среды, сезонной динамики влажности почвы, влияния эдафических факторов на состояние насаждений *Q. pubescens* в условиях Южного берега Крыма.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводили в лесных насаждениях *Q. pubescens* нижнего пояса южного макросклона Главной гряды Крымских гор. В 2023 г. после проведения рекогносцировочных работ были выбраны участки наиболее типичных растительных сообществ *Q. pubescens* современного этапа их формирования и развития в условиях Южного берега Крыма. В западной, центральной и восточной частях исследуемого района было заложено 6 пробных площадей размером 50 × 50 м, на которых с использованием методов геоботаники, лесоведения и лесной таксации (Анучин, 1982; Лавренко, Корчагина, 1964; Мелехов, 1980) изучали структуру и состав фитоценоза, таксационные характеристики насаждений (рис.). Индекс жизненного состояния определяли по 5-балльной шкале Алексеева (1990) (Алексеев, 1990).

Пробные площади размещали на склонах южной, юго-западной экспозиции с близкими показателями расположения по высоте н. у. м., что обеспечивало определенную идентичность условий произрастания по характеристике орографических факторов. По классификации почв России (2004), почвы на пробных площадках относились к типам – коричневые и буровоземы перегнойно-карбонатные (Humus-Carbonate Brown soils).

На пробных площадях почву изучали в разрезах по профилю в слоях 0–10, 10–20, 20–30, 30–40 и 40–50 см. При полевых и лабораторных исследованиях определяли гранулометрический состав почвы – пипеточным методом (ГОСТ 12536-2014), pH – потенциометрически по ГОСТ 26483-85, гумус – методом Тюрина в

модификации ЦИНАО (ГОСТ 26213-91), CaCO_3 – газоволюметрическим методом. Влажность почвы определяли методом горячей сушки (Вадюнина, Корчагина, 1986). Образцы почвы для данных исследований отбирали в середине каждого месяца с апреля по октябрь. С использованием данных метеорологических станций г. Севастополь, пгт Никита и г. Алушта анализировали погодные условия в районах проведения исследований. Статистические материалы результатов наблюдений обрабатывали, применяя методы биометрии (Лакин, 1990).

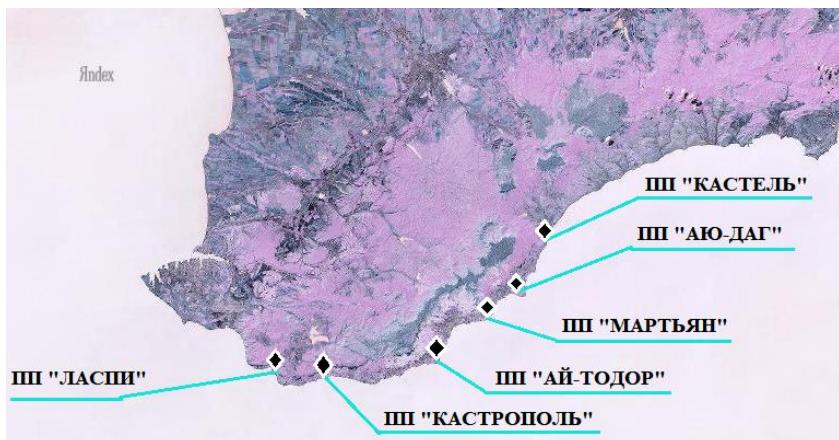


Рис. Карта-схема расположения пробных площадей (ПП) в насаждениях *Q. pubescens* Южного берега Крыма.

Fig. Map diagram of the location of sample plots (SP) in *Q. pubescens* plantations on the Southern Coast of Crimea.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В западной части района исследований, в бухте Ласпи, насаждения *Q. pubescens* характеризуются высокой степенью изреженности, их полнота составляет 0.4. Древостой формируют многоствольные деревья порослевого происхождения 3–4-ой генерации, что свидетельствует о высокой интенсивности заготовки древесины на данной территории в прошлом (табл. 1). В настоя-

щее время они характеризуются невысоким индексом жизненного состояния – 2.4. В составе редколесья второй по преобладанию древесной породой является *Juniperus excelsa* M. Bieb.; доля *Carpinus orientalis* Mill. и *Juniperus deltoides* R.P.Adams незначительна. Травянистый покров редкий, в основном представлен злаковыми. Из кустарников наиболее распространен *Hippocratea emerus* subsp. *Emeroides* (Boiss. & Spruner) Grauter & Burdet ex Lassen, меньше *Cistus tauricus* C. Presl.

Почва на участке обследования по гранулометрическому составу была неоднородна. В верхнем слое – тяжелосуглинистая, с глубины 30 см – легкоглинистая. Среднее значение физической глины в слое 0–50 см составило 60.9% (табл. 2). Почва достаточно обеспечена илистыми фракциями. Содержание ила по всему профилю существенно не меняется, средний показатель – 26.2%. Реакция почвенной среды (рН) щелочная, незначительно увеличивается с глубиной – от 7.9 до 8.4. Почва слабокарбонатная, CaCO_3 неравномерно распределен по почвенному профилю. В верхнем слое его концентрация составляет 6.3%, на глубине 10–20 см снижается до 3.9%, далее равномерно увеличивается, достигая максимального значения в нижнем слое почвы – 8.4%, что почти в два раза превышает показатель второго почвенного слоя. Очевидно, это связано с поступлением карбонатов от скального массива, окружающего практически сплошной стеной бухту Ласпи, с частицами известняка юрского периода в результате активных эрозионных процессов. Первоначально накапливаясь в верхнем слое почвы, они в последующем перемещаются в нижние, что вызвано смещением грунта вследствие оползневых процессов, которые характеризуются высокой интенсивностью на данной территории.

По содержанию питательных веществ почвы в районе бухты Ласпи относятся к слабогумусированным. Средняя концентрация гумуса в слое 0–50 см была 2.0%. Наличие гумуса заметно уменьшается с увеличением глубины расположения почвенного слоя, в верхнем она составляет 3.5%, в нижнем – 1.2%, то есть снижается почти в 3 раза. Коэффициент корреляции изменения содержания гумуса с глубиной залегания почвенного слоя в районе Ласпи имел величину –0.941.

Таблица 1. Характеристика насаждений *Q. pubescens* на пробных площадях

Table 1. Characteristics of *Q. pubescens* plantings on trial plots

Месторасположение	Ласпи	Кастрополь	Ай-Тодор	Мартъян	Аю-Даг	Кастель
Состав	5Дп4Мжв1Гр б+Мжк	7Дп2Мжк1 Грб+Мжв	6Дп2Мв1Зм1 Грб+Скр	7Дп23м 1Мжв	6Дп4Грб+ Мк	6Дп3Ям 1Фст
Средняя высота, м	5.5	5.1	7.3	5.0	7.0	6.0
Средний диаметр, см	27.2	26.3	24.3	18.1	27.0	16.0
Полнота	0.4	0.6	0.6	0.5	0.6	0.6
Состояние	2.4	2.3	2.9	2.6	2.6	2.5
Возраст, лет	75	81	69	85	78	83
Выс. н.у.м., м	100	102	121	92	122	123
Экспозиция	ЮЗ	Ю	ЮЗ	Ю	ЮЗ	Ю

Таблица 2. Физико-химические свойства почвы в биоценозах *Q. pubescens* Южного берега Крыма
Table 2. Physicochemical properties of soil in *Q. pubescens* biocenoses of the Southern Coast of Crimea

Место-расположение	Слой, см	рН	Гумус, %	CaCO ₃ , %	Граносостав, %	
					Физ. глина	Ил
Ласпи	0–10	7.9	3.5	6.3	59.5	26.3
	10–20	8.2	2.6	4.0	56.5	24.6
	20–30	8.4	1.5	4.2	57.5	24.7
	30–40	8.3	1.4	6.1	64.9	26.7
	40–50	8.2	1.2	8.4	66.2	28.7
Кастрополь	0–10	7.2	2.5	0.2	60.3	20.5
	10–20	7.5	1.7	0.3	55.9	18.5
	20–30	7.5	1.4	0.3	64.9	22.6
	30–40	7.5	1.5	0.4	63.0	23.0
	40–50	7.3	1.1	0.5	54.9	19.0
Ай-Тодор	0–10	7.5	7.0	2.9	59.9	40.4
	10–20	7.7	4.4	4.6	65.3	44.9
	20–30	7.6	3.3	3.6	65.8	46.9
	30–40	7.8	3.5	6.7	65.9	48.1
	40–50	7.8	4.6	17.0	64.1	41.8

Продолжение таблицы 2

Table 2 continued

Место-расположение	Слой, см	рН	Гумус, %	CaCO ₃ , %	Граносостав, %	
					Физ. глина	Ил
Мартъян	0–10	7.9	5.2	5.6	55.0	25.7
	10–20	8.1	3.4	8.1	57.1	26.4
	20–30	8.1	2.5	9.8	56.6	27.3
	30–40	8.1	2.0	9.40	64.1	30.6
	40–50	8.2	1.9	16.3	58.8	27.4
Аю-Даг	0–10	6.0	5.6	Не обнар.	57.1	18.5
	10–20	5.5	2.0	Не обнар.	56.1	20.6
	20–30	5.4	1.7	Не обнар.	57.4	23.8
	30–40	5.3	1.4	Не обнар.	62.6	30.7
	40–50	5.4	1.7	Не обнар.	66.2	30.9
Кастель	0–10	6.6	4.1	0.1	43.2	18.6
	10–20	6.6	1.8	0.2	45.9	24.8
	20–30	6.2	1.3	0.2	42.3	24.0
	30–40	6.2	1.6	0.3	42.0	22.4
	40–50	6.2	1.7	0.2	42.7	24.0

Это свидетельствует о значительном снижении интенсивности почвообразовательных процессов, связанных с формированием и накоплением питательных веществ в нижних слоях почвы.

Полевая влага в апреле в верхнем слое почвы была 13.1%, в последующем она увеличивалась, достигнув в июне максимума – 17.1%, что было связано с благоприятными условиями по увлажнению (табл. 3). Количество осадков, по данным метеорологической станции г. Севастополь в апреле–июне 2023 г., составило 149.8 мм, это превышало средний многолетний показатель (71 мм) почти в два раза. В июле количество осадков (27.4 мм) было несколько ниже многолетней нормы (32 мм), влажность почвы уменьшилась до 10.8%. В дальнейшем она постепенно снижалась, достигнув минимального значения в октябре – 10.0%. Аналогичная динамика с более низкими значениями содержания влаги наблюдалась по всему профилю почвы. При этом слой почвы в пределах 20–50 см был значительно иссущен уже в начале вегетационного периода. Самое низкое варьирование и наименьшее содержание влаги отмечалось на глубине 40–50 см, в октябре ее величина была минимальна – 8.9%. Оценка синхронизации динамики увлажнения с увеличением глубины почвенного разреза показала значительный уровень связи влажности почвы верхнего слоя с нижележащими, коэффициент корреляции изменялся в пределах 0.930–0.956, что характеризует высокие инфильтрационные свойства почвы на территории бухты Ласпи.

На пробной площади “Кастрополь”, расположенной недалеко от с. Береговое Симеизского поселкового совета, полнота древостоя была 0.6, при этом высота и диаметр деревьев меньше по сравнению с аналогичными показателями в бухте Ласпи. Состав насаждения – 7Дп2Мк1Грб+Мв. *Q. pubescens* на данной территории низкорослый, средняя высота 5.1 м, диаметр ствола – 26.3 см, преобладают многоствольные деревья порослевого происхождения, индекс жизненного состояния которых составляет 2.3. В лесном массиве присутствует много крупного *J. deltoides*, меньше распространены *J. excelsa* и *C. orientalis*. Из кустарничков произрастают *C. tauricus* (проективное покрытие 30%) и *Ruscus aculeatus* L. (15%). Травянистый покров редкий.

Таблица 3. Полевая влажность почвы (% от веса)

Table 3. Field soil moisture (% of weight)

Месторасположение	Слой, см	Месяцы						
		Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь
Ласпин	0–10	13.1	14.1	17.1	10.8	11.6	10.1	10.0
	10–20	11.1	11.8	17.2	8.9	10.6	9.4	9.3
	20–30	10.8	10.2	14.2	8.4	9.5	9.1	9.1
	30–40	10.5	10.7	14.9	9.1	9.9	9.6	9.1
	40–50	10.0	10.3	13.3	9.2	9.8	8.9	8.9
Кастрополь	0–10	10.5	8.9	9.7	6.3	8.3	7.5	7.5
	10–20	10.3	7.9	10.4	8.3	5.9	6.7	6.6
	20–30	10.3	8.1	8.4	9.0	6.0	6.5	6.4
	30–40	9.8	7.6	8.8	9.8	6.2	5.7	5.7
	40–50	9.3	4.3	9.9	10.1	6.2	5.3	5.5
Ай-Тодор	0–10	30.3	23.1	20.4	9.2	17.9	7.6	7.6
	10–20	28.0	22.6	16.0	9.3	16.6	6.8	6.8
	20–30	24.8	24.3	13.9	8.7	15.6	6.7	6.6
	30–40	23.9	21.9	13.0	8.9	15.2	6.1	6.0
	40–50	23.0	21.0	13.6	9.1	14.2	5.5	5.5

Продолжение таблицы 3

Table 3 continued

Месторасположение	Слой, см	Месяцы						
		Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь
Мартъян	0–10	10.5	11.7	10.5	8.1	8.2	7.9	7.1
	10–20	10.1	11.4	9.9	9.3	6.2	7.4	7.2
	20–30	9.9	9.7	10.2	8.6	6.0	7.5	7.3
	30–40	9.3	9.6	9.7	8.9	6.1	7.7	7.9
	40–50	9.6	9.9	10.0	9.1	6.2	8.0	7.9
Аю-Даг	0–10	11.5	9.7	10.9	7.6	7.1	5.8	6.1
	10–20	10.2	10.8	9.00	7.3	7.5	7.2	6.0
	20–30	10.2	11.9	11.3	8.6	9.2	8.2	7.4
	30–40	10.5	13.2	12.0	9.0	9.8	9.3	8.6
	40–50	10.1	14.1	11.5	9.5	9.6	9.2	8.6
Кастель	0–10	11.0	8.3	9.7	6.3	7.5	6.9	5.6
	10–20	10.1	9.2	10.4	8.3	8.1	7.5	8.7
	20–30	10.2	9.5	8.4	9.0	8.2	7.9	9.2
	30–40	10.5	9.0	8.8	9.8	7.9	7.4	8.3
	40–50	10.0	9.2	10.0	10.1	7.8	7.3	8.2

В районе Кастрополя гранулометрический состав почвы в насаждениях *Q. pubescens* неоднороден. Максимальное количество глины отмечалось на глубине 20–30 см – 60.3%, минимальное в нижнем почвенном слое – 54.9%. В целом по профилю наблюдается вариация гранулометрического состава почвы от тяжелосуглинистого до легкоглинистого. В двух слоях (10–20 и 40–50 см) почва тяжелосуглинистая, в остальных – легкоглинистая. Среднее значение физической глины в слое 0–50 см – 59.8%. Содержание ила меньше, в сравнении с почвой бухты Ласпи, оно составило 20.7%. Реакция почвенной среды (рН) неоднородна – варьирует от слабощелочной до щелочной, незначительно увеличивается с глубиной. Почва слабокарбонатная, содержание CaCO_3 не превышало 0.5%. Наличие гумуса в почве незначительное, по данному показателю она относится к слабогумусированной. Среднее содержание гумуса в слое 0–50 см было 1.6%, при этом его концентрация достаточно равномерно уменьшается с глубиной – от 2.5% в верхнем до 1.1% в нижнем слое почвы. Снижение почвенного плодородия, очевидно, свидетельствует о том, что лесные биоценозы в Кастрополе претерпели негативное воздействие раньше, по сравнению с лесными сообществами бухты Ласпи, вследствие чего процессы деградации почвенной среды здесь определяются более длительной и глубокой реализацией деструктивных явлений в развитии эдафотопа.

Половая влага по почвенному профилю в насаждениях *Q. pubescens* Кастрополя распределена не равномерно, она характеризуется очень низкими показателями в течение всего периода наблюдений. В апреле влажность верхнего слоя почвы была 10.5%, что на 2.5% меньше по сравнению с насаждениями бухты Ласпи. В дальнейшем содержание влаги в почве постепенно снижалось, достигнув минимальных величин в сентябре–октябре, когда влажность верхнего горизонта составила 7.5%. Наиболее низкое значение влагосодержания в этот период наблюдалось на глубине 40–50 см – 5.3–5.5%, что почти в два раза меньше по сравнению с аналогичным показателем для экотопов Ласпи. Среднее значение содержания влаги по почвенному профилю за период проведения наблюдений составило 7.8%. Очевидно, что столь незначительное количество влаги наряду со спецификой объема вы-

падающих осадков определяется низким содержанием илистых фракций, так как они в наибольшей степени обеспечивают накопление и удержание капиллярной влаги в почве (Теории и методы физики почв, 2007). В Кастрополе во второй половине вегетационного периода количество влаги в почве, особенно в нижних слоях, достигает уровня показателя завядания, который для *Q. pubescens* в летний период составляет 5–6%. Ограничение доступной влаги в почве является одной из причин снижения жизненного состояния насаждений *Q. pubescens* Кастрополя. Жесткость режима увлажнения также определяет значительную асинхронность динамики влагонакопления в верхнем почвенном слое по сравнению с нижележащими. В течение периода наблюдений уровень корреляции содержания влаги в слое 0–10 см с нижерасположенными характеризовался следующими показателями: 0.642; 0.471; 0.331; 0.216. Это свидетельствует о дисбалансе влагонакопления по глубине почвенного профиля. В течение вегетационного периода изменение количества влаги в нижних слоях проявляет незначительную связь с режимом увлажнения верхнего слоя почвы, что характеризует высокую автономность режима влагообеспечения и ограничение возможностей нормального функционирования корневой системы *Q. pubescens* в эдафотопах Кастрополя.

На мысе Ай-Тодор состав насаждений был 6Дп2Мв1Змл1Грб+Скр, полнота древостоя – 0.6. Высота деревьев *Q. pubescens* равна в среднем 7 м, диаметр ствола – 24 см. Преобладают многоствольные деревья порослевого происхождения 3–4-ой генерации, индекс их жизненного состояния несколько выше по сравнению с предыдущими участками проведения наблюдений – 2.9. В составе древостоя, наряду с *J. excelsa*, присутствует *Arbutus andrachne* L. Отличительной особенностью насаждений мыса Ай-Тодор является наличие *Pinus nigra* subsp. *pallasiana* (Lamb.) Holmboe. Второй ярус формируют молодые растения *J. excelsa* и низкорослый *C. orientalis*. Единично встречается *Cormus domestica* (L.) Spach. Из кустарников наиболее многочислен *R. aculeatus* с проективным покрытием 35%.

В районе мыса Ай-Тодор гранулометрический состав почвы в насаждениях *Q. pubescens* однороден и представлен в основном глиной легкой, кроме верхнего слоя 0–10 см, где почва тяжелосу-

глинистая. Среднее значение физической глины в слое 0–50 см было 64.2%. Почва содержит большое количество илистых фракций, наличие которых увеличивается с глубиной расположения почвенного слоя, за исключением нижнего. Общее содержание ила по профилю – 44.4%. Реакция почвенной среды (рН) – щелочная, достаточно равномерно возрастает от верхнего слоя почвы к нижнему. Концентрация карбонатов в почве невысокая, однако с глубиной этот показатель увеличивается, достигая в нижнем слое величины 17%. Содержание CaCO_3 по глубине почвенного профиля в среднем составляет 6.9%. Концентрация гумуса в почве мыса Ай-Тодор заметно выше по сравнению с насаждениями бухты Ласпи и Кастрополя. Наибольшее его количество отмечено в верхнем почвенном слое (7.0%), с увеличением глубины почвенного разреза содержание гумуса равномерно уменьшается, однако в нижнем слое наблюдается некоторое повышение его концентрации. Это свидетельствует о том, что в недавнем прошлом на данных территориях существовали достаточно продуктивные лесные сообщества, развитие которых обеспечивало значительное поступление опада и последующие этапы формирования и накопления органического вещества в почве.

Содержание полевой влаги в почве в насаждениях *Q. pubescens* мыса Ай-Тодор характеризовалось сравнительно высокими значениями, особенно в первые месяцы вегетационного периода, она распределялась достаточно равномерно по глубине. Резкое уменьшение данного показателя произошло в июле, когда влажность верхнего слоя почвы снизилась более чем в 2 раза по сравнению с предыдущим месяцем. Средняя величина содержания влаги по всей глубине почвенного слоя (0–50 см) в июле составила 9.0%, в то время как в июне она была 15.4%. В августе в насаждениях *Q. pubescens* мыса Ай-Тодор влажность почвы возросла почти в 2 раза, по сравнению с показателями июля, что было связано с выпадением большого количества осадков в конце июля, объем которых, по данным Севастопольской метеорологической станции, составил 25.3 мм. В сентябре влажность почвы резко снизилась почти в 2.5 раза. Наиболее интенсивное иссушение наблюдалось в нижних слоях почвы, их влажность в этот период практически сравнялась с аналогичными показателями экотопов Кастропо-

ля. В октябре тенденция снижения содержания влаги в почве сохранилась, средний показатель по почвенному профилю был равен 6.5%, что в 4 раза меньше аналогичной величины для апреля. Экотопы *Q. pubescens* мыса Ай-Тодор характеризуются значительной синхронизацией влагосодержания верхнего слоя почвы с нижележащими, коэффициент корреляции изменялся в пределах 0.950–0.987. Данные особенности свидетельствуют о том, что процессы роста и развития насаждений *Q. pubescens* мыса Ай-Тодор в значительной степени определяются спецификой сезонной динамики увлажненности почвы. В первые месяцы вегетации сравнительно высокий уровень содержания влаги в почве положительно влияет на рост *Q. pubescens*, однако резкое ее снижение во второй половине лета до значений, близких к показателям биоценозов западной части, оказывает стрессовое действие на состояние древостоев, сезонное развитие которых на первых этапах было адаптировано к условиям повышенного влагообеспечения.

На мысе Мартъян *Q. pubescens* формирует сравнительно низкорослые древостои средней высотой 5.0 м, диаметром – 18.1 см, полнотой – 0.5. Состав насаждений – 7Дп23мл1Мв+Мк. Многоствольность деревьев порослевого происхождения увеличивается до 4–5 стволов от одного пня. Помимо *Q. pubescens* распространены *A. andrachne*, *J. excelsa*. Единично встречается *J. deltoides* и *C. orientalis*. *R. aculeatus* покрывает до 10% поверхности почвы. Присутствует *C. tauricus*. Травянистый покров фрагментирован.

В биоценозах *Q. pubescens* мыса Мартъян почва по гранулометрическому составу не однородна. В целом она представлена суглинком тяжелым, лишь в слое 30–40 см – глиной легкой. Среднее значение физической глины по почвенному профилю – 58.3%. Почва в достаточной мере обеспечена илистыми фракциями. Содержание ила в пределах среза почвы (0–50 см) в среднем было равно 27.5%. Реакция почвенной среды (рН) щелочная – 7.9–8.2, она незначительно увеличивается с глубиной. Почва является слабокарбонатной, среднее содержание CaCO_3 – 9.9%, с глубиной его концентрация существенно увеличивается и в нижнем слое составляет 16.3%. Это связано с тем, что почвы мыса Мартъян сформировались на каменисто-щебенчатых грунтах с высоким

содержанием известняка (Плугатарь, 2022; Гаврилова и др., 2018). Почвы слабо обеспечены гумусом, относятся к слабогумусированным. В верхнем слое его концентрация была 5.2%, с увеличением глубины она постепенно снижается, достигнув минимальных значений в нижнем слое почвы – 1.9%. Среднее содержание гумуса по почвенному профилю составило 3.0%.

В начале вегетационного периода влажность почвы в насаждениях *Q. pubescens* мыса Мартыян имела сравнительно невысокие значения. В апреле среднее содержание влаги в почвенном слое 0–50 см составило 9.9%, что ниже аналогичного показателя (10.1%) для экотопов Кастрополя. В мае влажность почвы несколько увеличилась, средний показатель по профилю составил 10.4%. Это было вызвано обильными дождями, т. к. по данным Никитской метеостанции в конце апреля–начале мая в этом районе выпало 59.7 мм осадков. В дальнейшем количество влаги в почве постепенно снижалось, при некотором увеличении влажности верхнего слоя; общее ее содержание в почвенном слое 0–50 см достигло минимальных значений в августе – 6.5%. В сентябре–октябре, за исключением верхнего слоя, произошло некоторое увеличение влагосодержания по почвенному профилю. В биоценозах *Q. pubescens* мыса Мартыян наблюдалось снижение синхронизации влагонасыщения почвенных слоев. Коэффициент корреляции по разрезу профиля изменялся от 0.863 в верхней части до 0.730 в нижней, что свидетельствует об уменьшении интенсивности процессов инфильтрации влаги в почве экотопов мыса Мартыян по сравнению с экотопами мыса Ай-Тодор и бухты Ласпи.

На горе Аю-Даг изучение почвенных условий в биоценозах *Q. pubescens* проводили в западной его части, полнота древостоя на участке обследования была 0.6, состав – 6Дп4Грб+Мк. Средняя высота деревьев *Q. pubescens* – 6.5 м, диаметр ствола – 27 см, общее состояние насаждений – удовлетворительное. В древостое преобладают многоствольные деревья порослевого происхождения 3–4-ой генерации. В структуре насаждения значительную часть составляет *C. orientalis*, присутствует *Acer campestre* L., единично *Fraxinus ornus* L., *Crataegus germanica* (L.) Kuntze, *Euonymus europaeus* L. *R. aculeatus* покрывает до 50% поверхности почвы, встречается *Hedera helix* L.

Состав почвы на г. Аю-Даг по содержанию глины приближается к экотопам мыса Мартын, в трех верхних слоях доля данной фракции изменяется в пределах 56.1–57.4%, на глубине 40–50 см она возрастает до 66.2%. Среднее значение физической глины в слое 0–50 см – 59.9%. Таким образом, по гранулометрическому составу почвы г. Аю-Даг варьируют от тяжелосуглинистых до легкоглинистых. Содержание ила в верхнем слое почвы незначительно (18.5%), однако с глубиной этот показатель увеличивается до 30.9%. Среднее содержание ила по почвенному профилю – 24.9%. Реакция почвенной среды (pH) не однородна, в верхнем слое она слабокислая, в нижнем – кислая. Карбонаты в почве биоценозов *Q. rubescens* г. Аю-Даг отсутствуют. Это связано с тем, что материнской породой на данной территории является габбродиабаз – вулканическая горная порода, которая сформировалась в результате интрузии магмы в осадочные отложения и образования лакколита, что объясняет снижение pH почвенной среды. Почвы на г. Аю-Даг относятся к слабогумусированным. Среднее содержание гумуса в слое 0–50 см – 2.5%. При этом они характеризуются значительным градиентом концентрации гумуса между верхним слоем и нижележащими, что свидетельствует о снижении эффективности формирования органических веществ вследствие увеличения кислотности почвенной среды.

Влажность верхнего слоя почвы на г. Аю-Даг в апреле была 11.5%, при этом незначительно уменьшалась с глубиной. В мае влажность верхнего слоя почвы снизилась до 9.7%, однако в нижележащих наблюдалось достаточно устойчивое увеличение влагосодержания, которое на глубине 40–50 см достигло величины 14.1%. В последующие месяцы проведения исследований данная ситуация практически полностью сохранилась, то есть при заметном иссушении верхнего слоя почвы наблюдался обратный градиент изменения ее влажности по глубине почвенного профиля. Наиболее сильно это проявилось во второй половине вегетационного периода, что может быть связано с близким залеганием водоупорного грунта, главным компонентом которого являются плотные слои габбродиабаза. В апреле–июне в восточной части Южного берега Крыма, по данным Алуштинской метеорологической станции, количество осадков составило 170.1 мм, что значительно

превышало многолетнюю норму (84 мм). Избыточная влага активно дренировала и, достигнув водоупорного слоя, накапливавшись в нижних слоях почвы. Данная специфика динамики влагосодержания в почвенном профиле обеспечивает реализацию процессов роста растений, корневая система которых развивается на глубине 20–50 см. Основной объем ризосферы *Q. pubescens* формируется в слое почвы 10–50 см (Кочкин, 1967). Таким образом, несмотря на сравнительно небольшое содержание влаги в почве, средний показатель по профилю за период наблюдений составил 9.4%, снижение интенсивности иссушения нижних ее слоев в биоценозах *Q. pubescens* г. Аю-Даг повышает возможности его роста в засушливый период.

На г. Кастель полнота древостоя – 0.6, состав – 6Дп3Ям1Фст+Мк. Средняя высота стволов *Q. pubescens* – 6 м, средний диаметр – 16 см. Растения многоствольные, 2–3-ей генерации, характеризуются невысоким индексом жизненного состояния – 2.5. Древесный ярус формируют также *F. ornus*, *Pistacia atlantica* Desf., реже встречается *Paliurus spina-christi* Mill. Из кустарничков распространен *C. tauricus* с проективным покрытием 25%, *R. aculeatus* занимает до 10% площади экотопов.

Почва на г. Кастель заметно отличается по гранулометрическому составу от других изучаемых участков произрастания *Q. pubescens* на Южном берегу Крыма. Она характеризуется наиболее низким содержанием физической глины, средняя величина данного показателя в слое почвы 0–50 см составила 43.2%. При этом глина достаточно равномерно распределена по почвенному профилю. Количество ила также невысоко, средняя величина по профилю – 22.7%, что ненамного превышает данный показатель для экотопов Кастрополя, которые характеризуются наиболее низким содержанием илистой фракции в почве. Реакция почвенной среды (pH) в биоценозах *Q. pubescens* г. Кастель неоднородна: в верхнем слое она нейтральна, с глубиной уменьшается и доходит до слабокислой. Концентрация карбонатов в почве очень низкая, количество CaCO_3 не превышало 0.25%. Тенденция к увеличению кислотности и низкая концентрация карбонатов в почве г. Кастель определяются тем, что они сформированы на подстилающей горной породе – габбро-диабазе. Гора Кастель, так же как

и гора Аю-Даг, является лакколитом. Содержание гумуса и особенности его распределения по почвенному профилю близки к аналогичным показателям экотопов г. Аю-Даг. В верхнем слое количество гумуса составляет 4.1%. В слое почвы 10–20 см она уменьшается более чем в два раза и далее снижается с увеличением глубины почвенного разреза. Очевидно, данное явление, так же как и на г. Аю-Даг, определяется спецификой динамики рН.

Наиболее высокая влажность почвы на г. Кастель отмечалась в начале вегетационного периода, в апреле ее величина в верхнем слое была равна 11.1%, среднее значение по профилю – 10.4%. В мае влажность почвы снизилась в наибольшей степени в верхнем слое. В июне произошло увеличение влажности почвы в слое 0–20 см и 40–50 см. В июле влажность почвы на глубине 0–20 см снизилась, в то время как в нижележащих слоях она возросла. Очевидно, инфильтрационная влага достигла водоупорного грунта, что способствовало ее накоплению в нижних слоях почвы. В последующем влажность почвы в биоценозах *Q. pubescens* г. Кастель постепенно снижалась, при этом почвенный слой 20–50 см характеризовался более высоким ее содержанием по сравнению с вышележащими. Данная специфика сезонной динамики влагосодержания почвы весьма близка к аналогичным характеристикам водного баланса почвенной среды в биоценозах *Q. pubescens* г. Аю-Даг. Таким образом, подстилающая горная порода на г. Аю-Даг и г. Кастель – габбро-диабаз – оказывает значительное влияние на динамику влагосодержания, процессы формирования и накопления органического вещества в почве насаждений *Q. pubescens*.

Характеризуя в целом почвенные условия биоценозов *Q. pubescens* Южного берега Крыма, следует отметить, что экологическая ситуация на данных территориях претерпела значительные изменения, связанные с тотальным уничтожением коренных древостоев в период активного хозяйственного освоения приморской части Крыма во второй половине прошлого тысячелетия (Коба, 2022; Плугатарь, 2015; Станкевич, 1908; Троицкий, 1929). Ликвидация девственных насаждений определила последующие этапы негативных явлений, связанных со смызовом почвы, развитием эрозионных и оползневых процессов, изменением микроклиматиче-

ских условий, которые обеспечивались наличием мощного полога векового древостоя. Последующие этапы деградации биоценотической среды определили коренные изменения структуры и состава растительных сообществ, формирование на данных территориях низко продуктивных порослевых насаждений *Q. pubescens*, на некоторых участках полную утрату древесного яруса. Одна из причин деструктивных явлений в развитии биоценозов *Q. pubescens* – изменение водного баланса почвенной среды. Низкое содержание влаги в корнеобитаемом слое почвы – наиболее жесткий лимитирующий фактор, ограничивающий семенное возобновление его коренных древостоев на Южном берегу Крыма. Сеянцы *Q. pubescens*, сформировавшиеся в благоприятные по семенной продуктивности и погодным условиям годы, в значительном количестве усыхают в летне–осенний период крайне низкого содержания влаги в почве. В настоящее время подрост в естественных насаждениях *Q. pubescens* практически полностью представлен корневыми отпрысками, не имеющими перспективы успешного развития и формирования полноценного древостоя (Коба, 2023). Возможности роста порослевого *Q. pubescens* в данных условиях обеспечиваются мощной корневой системой материнского древостоя, которая, несмотря на его вырубку и последующие многократные рубки пневмических генераций, еще продолжает функционировать.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Общий анализ результатов проведенных исследований показывает, что наиболее жесткие условия по характеристике качества почвенной среды в настоящее время складываются в западной части произрастания *Q. pubescens* на Южном берегу Крыма. В насаждениях Ласпи и Кастрополя самый низкий уровень концентрации гумуса и содержания влаги в почве. В Кастрополе во второй половине вегетационного периода количество влаги в почве в нижних слоях достигает показателя завядания. В центральной части массива лесов *Q. pubescens* Южного берега Крыма, при некотором улучшении почвенных условий, общая специфика изменения качества почвенной среды весьма близка к насаждениям западных территорий. Процессы роста и развития древостоев *Q. ri-*

bescens мыса Ай-Тодор в значительной степени определяются сезонной динамикой увлажненности почвы. В первые месяцы вегетации сравнительно высокое содержание влаги в почве положительно влияет на рост *Q. pubescens*, однако резкое ее снижение во второй половине лета до значений, близких к показателям биоценозов западной части, оказывает стрессовое действие на состояние древостоев. В восточной части произрастания *Q. pubescens* на Южном берегу Крыма важным фактором, определяющим особенности почвенных условий, является материнский грунт, сформированный на породах вулканического происхождения. Габбродиабаз лакколитов Аю-Даг и Кастель, являясь подстилающей породой, влияет на кислотность почвы, процессы формирования и накопления гумуса в ней. Плотные слои габбродиабаза ограничивают возможности дренажа влаги, ее накопление над водоупорным грунтом повышает влагообеспечение древостоев *Q. pubescens* в экотопах г. Аю-Даг и Кастель. Тотальная вырубка в прошлом коренных древостоев *Q. pubescens* Южного берега Крыма определила глубокую деградацию структуры и состава растительных сообществ, формирование на данных территориях низкопродуктивных порослевых насаждений. Одной из причин деструктивных явлений в развитии биоценозов *Q. pubescens* является изменение водного баланса почвенной среды. Возможности роста порослевых насаждений *Q. pubescens* Южного берега Крыма в настоящее время определяются мощной корневой системой материнского древостоя, которая продолжает еще функционировать.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев В.А. Лесные экосистемы и атмосферное загрязнение. Л.: Наука, 1990. 200 с.
2. Анучин Н.П. Лесная таксация. М.: Лесн. пром-сть, 1982. 512 с.
3. Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А. Методы исследования физических свойств почв. М.: Агропромиздат, 1986. 416 с.
4. Гаврилова В.И., Герасимова М.И., Гуров И.А., Костенко И.В., Плугатарь Ю.В. Почвы, почвенный покров и почвенно-геохимические особенности Никитского ботанического сада. М.: Географический факультет МГУ, 2018. 83 с.
5. Коба В.П. Высотное распределение и возрастной состав древостоев *Pinus pallasiana* (*Pinaceae*) на южном макросклоне Главной гряды

- Крымских гор // Растительные ресурсы. 2022. Т. 58. Вып. 1. С. 58–68.
6. Коба В.П., Пищеничников Н.А., Нагорняк А.А. Возобновление *Quercus pubescens* Willd. в заповеднике “Мыс Мартъян” // Научные записки природного заповедника “Мыс Мартъян”. 2023. Вып. 14. С. 150–156.
7. Кочкин М.А. Почвы, леса и климат горного Крыма и пути их рационального использования. М.: Колос, 1967. 368 с.
8. Лавренко Е.М., Корчагина А.А. Полевая геоботаника. М.-Л.: АН СССР, 1964. Т. 3. 530 с.
9. Лакин Г.Ф. Биометрия. М.: Высшая школа, 1990. 352 с.
10. Мелехов И.С. Лесоведение. М.: Лесн. пром-сть, 1980. 408 с.
11. Плугатарь Ю.В. Леса Крыма: монография. Симферополь: ИТ “АРИАЛ”, 2015. 368 с.
12. Плугатарь Ю.В., Коба В.П., Новицкий М.Л., Пищеничников Н.А., Папельбу В.В. Почвенные условия в насаждениях *Arbutus andrachne* L. Южного берега Крыма // Земледелие. 2022. № 8. С. 7–12. DOI: <https://doi.org/10.24412/0044-3913-2022-8-7-12>.
13. Плугатарь Ю.В., Корженевский В.В., Абраменков А.А., Шибляк или маквис? О внедрении *Quercus ilex* L. в фитоценозы Южнобережного Крыма // Биология растений и садоводство: теория, инновации. 2022. Вып. 3(164). С. 6–20.
14. Станкевич В.И. Из лесов горного Крыма. С.-П., 1908. 167 с.
15. Теории и методы физики почв. Коллективная монография / Под ред. Е.В. Шейна и Л.О. Карпачевского. М.: “Гриф и К”, 2007. 616 с.
16. Троицкий Н.Д. Дубовые леса Крымского государственного заповедника. М.: Изд-во Главнауки, 1929. 168 с.
17. Arend M., Kuster T., Gunthardt-Goerg M.S., Dobbertin M. Provenance-specific growth responses to drought and air warming in three European oak species (*Quercus robur*, *Q. petraea* and *Q. pubescens*) // Tree Physiology. 2011. P. 287–297.
18. Alen B., Levanić T., Stojasavljević D., Kušan V. Site Index and Volume Growth Percentage Determination for Privately Owned Uneven-aged Stands of *Quercus pubescens* and *Quercus ilex* along the Croatian Adriatic Coast // South-east European forestry. 2019. No. 1. P. 65–75.
19. Bocharnikov M.V. Spatial structure of the vegetation cover of the Abrau Peninsula (on the example of the Vodopadnaya Shchel) // Geobotanical mapping. 2021. No. 2021. P. 62–83.
20. Chrtek J.P., Davis H. Flora of turkey and the east aegean Islands // Folia geobot. phytotax. 1984. Vol. 7(19). P. 322.
21. Debussche M., Debussche G., Lepart J. Changes in the vegetation of *Quercus pubescens* woodland after cessation of coppicing and grazing // J. Veg. Sci. 2001. Vol. 12(1). P. 81–92.

22. Facioni L., Burrascano S., Del Vico E., Rosati L., Tilia A., Blasi C. Phytosociological analysis of white oak (*Quercus pubescens* s.l.) woodlands and related successional stages: spatial patterns and their drivers // *Phytocoenologia*. 2015. No. 4. P. 325–364.
23. Ripullone F., Camarero J.J., Colangelo M., Voltas J. Variation in the access to deep soil water pools explains tree-to-tree differences in drought-triggered dieback of Mediterranean oaks // *Tree Physiology*. 2020. No. 5. P. 591–604.
24. Santonja M., Pereira S., Gauquelin T., Quer E., Simioni G., Limousin J.-M., Ourcival J.-M., Reiter I.M., Fernandez C., Baldy V. Experimental precipitation reduction slows down litter decomposition but exhibits weak to no effect on soil organic carbon and nitrogen stocks in three mediterranean forests of Southern France // *Forests*. 2022. No. 9. P. 1485.
25. Wellstein C., Francesco S. The status of *Quercus pubescens* Willd. in Europe // In: Box, Elgene Owen (Hrsg.): Warm-Temperate Deciduous Forests around the Northern Hemisphere. Cham: Springer, 2015. P. 153–163.

REFERENCES

1. Alekseev V.A., *Lesnyye ekosistemy i atmosfernoye zagryazneniye* (Forest ecosystems and atmospheric pollution), Leningrad: Nauka, 1990, 200 p.
2. Anuchin N.P., *Lesnaya taksatsiya* (Forest taxation), Moscow: Lesn. promst, 1982, 512 p.
3. Vadyunina A.F., Korchagina Z.A., *Metody issledovaniya fizicheskikh svoystv pochv* (Methods for studying the physical properties of soils), Moscow: Agropromizdat, 1986, 416 p.
4. Gavrilova V.I., Gerasimova M.I., Gurov I.A., Kostenko I.V., Plugatar Yu.V., *Pochvy, pochvennyy pokrov i pochvenno-geokhimicheskiye osobennosti Nikitskogo botanicheskogo sada* (Soils, soil cover and soil-geochemical features of the Nikitsky Botanical Garden), Moscow: Faculty of Geography, Moscow State University, 2018, 83 p.
5. Koba V.P., Altitudinal distribution and age composition of tree stands *Pinus pallasiana* (Pinaceae) on the southern macroslope of the Main Ridge of the Crimean Mountains, *Plant Resources*, 2022, Vol. 58, Iss. 1, pp. 58–68.
6. Koba V.P., Pshenichnikov N.A., Nagorniy A.A., Renewal of *Quercus pubescens* Willd in the Mys Martyan Nature Reserve, *Scientific Notes of the Mys Martyan Nature Reserve*, 2023, Iss. 14, pp. 150–156.
7. Kochkin M.A., *Pochvy, lesa i klimat gornogo Kryma i puti ikh ratsional'nogo ispol'zovaniya* (Soils, Forests and climate of Mountain Crimea and ways of their rational use), Moscow: Kolos, 1967, 368 p.
8. Lavrenko E.M., Korchagina A.A., Polevaya geobotanika (Field

- Geobotany), Moscow-Leningrad: USSR Academy of Sciences, 1964, Vol. 3, 530 p.
9. Lakin G.F., *Biometry*, Moscow: Higher School, 1990, 352 p.
10. Melekhov I.S., *Forestry*, Moscow: Lesn. prom-st, 1980, 408 p.
11. Plugatar Yu.V., *Forests of Crimea*, Simferopol: IT "ARIAL", 2015, 368 p.
12. Plugatar Yu.V., Koba V.P., Novitsky M.L., Pshenichnikov N.A., Papelbu V.V., Soil conditions in *Arbutus andrachne* L. plantings of the Southern Coast of Crimea, *Zemledelie*, 2022, No. 8, pp. 7–12, DOI: <https://doi.org/10.24412/0044-3913-2022-8-7-12>.
13. Plugatar Yu.V., Korzhenevsky V.V., Abramakov A.A., Shiblyak or maquis? On the introduction of *Quercus ilex* L. into phytocenoses of the South Coast Crimea, *Plant biology and horticulture: theory, innovations*, 2022, Iss. 3(164), pp. 6–20.
14. Stankevich V.I., *From the forests of mountain Crimea*, St. Petersburg, 1908, 167 p.
15. E.V. Shein and L.O. Karpachevsky (Eds.), Theories and methods of soil physics, Moscow: "Grif i K", 2007, 616 p.
16. Troitsky N.D., *Oak forests of the Crimean State Nature Reserve*, Moscow: Glavnauki Publishing House, 1929, 168 p.
17. Arend M., Kuster T., Gunthardt-Goerg M.S., Dobbertin M., Provenance-specific growth responses to drought and air warming in three European oak species (*Quercus robur*, *Q. petraea* and *Q. pubescens*), *Tree Physiology*, 2011, pp. 287–297.
18. Alen B., Levanič T., Stojasavljević D., Kušan V., Site Index and Volume Growth Percentage Determination for Privately Owned Uneven-aged Stands of *Quercus pubescens* and *Quercus ilex* along the Croatian Adriatic Coast, *South-east European forestry*, 2019, No. 1, pp. 65–75.
19. Bocharnikov M.V., Spatial structure of the vegetation cover of the Abrau Peninsula (on the example of the Vodopadnaya Shchel), *Geobotanical mapping*, 2021, No. 2021, pp. 62–83.
20. Chrtěk J.P., Davis H., Flora of turkey and the east aegean Islands, *Folia geobot. phytotax.*, 1984, Vol. 7(19), pp. 322.
21. Debussche M., Debussche G., Lepart J., Changes in the vegetation of *Quercus pubescens* woodland after cessation of coppicing and grazing, *J. Veg. Sci.*, 2001, Vol. 12(1), pp. 81–92.
22. Facioni L., Burrascano S., Del Vico E., Rosati L., Tilia A., Blasi C., Phytosociological analysis of white oak (*Quercus pubescens* s.l.) woodlands and related successional stages: spatial patterns and their drivers, *Phytocoenologia*, 2015, No. 4, pp. 325–364.
23. Ripullone F., Camarero J.J., Colangelo M., Voltas J., Variation in the access to deep soil water pools explains tree-to-tree differences in drought-

triggered dieback of Mediterranean oaks, *Tree Physiology*, 2020, No. 5, pp. 591–604.

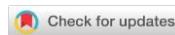
24. Santonja M., Pereira S., Gauquelin T., Quer E., Simioni G., Limousin J.-M., Ourcival J.-M., Reiter I.M., Fernandez C., Baldy V., Experimental precipitation reduction slows down litter decomposition but exhibits weak to no effect on soil organic carbon and nitrogen stocks in three mediterranean forests of Southern France, *Forests*, 2022, No. 9, pp. 1485.

25. Wellstein C., Francesco S., The status of *Quercus pubescens* Willd. in Europe, In: Box, Elgene Owen (Hrsg.) *Warm-Temperate Deciduous Forests around the Northern Hemisphere*, Cham: Springer, 2015, pp. 153–163.

УДК 631.4



DOI: 10.19047/0136-1694-2025-125-138-156



Ссылки для цитирования:

Столбовой В.С., Гребенников А.М., Холодов В.А., Шилов П.М., Духанин Ю.А. Биомасса гумусообразования в национальной модели управления бюджетом углерода в почвах агроэкосистем // Бюллетень Почвенного института имени В. В. Докучаева. 2025. Вып. 125. С. 138-156. DOI: 10.19047/0136-1694-2025-125-138-156

Cite this article as:

Stolbovoy V.S., Grebennikov A.M., Kholodov V.A., Shilov P.M., Dukhanin Yu.A., Biomass of humus formation in the national model of carbon budget management in soils of agroecosystems, Dokuchaev Soil Bulletin, 2025, V. 125, pp. 138-156, DOI: 10.19047/0136-1694-2025-125-138-156

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 study was carried out as part of the implementation of the most important innovative project of national significance “Development of a system for ground-based and remote monitoring of carbon pools and greenhouse gas fluxes on the territory of the Russian Federation. Ensuring the creation of a system for recording data on flows of climatically active substances and carbon budget in forests and other terrestrial ecological systems” (reg. No. 123030300031-6).

Биомасса гумусообразования в национальной модели управления бюджетом углерода в почвах агроэкосистем

**© 2025 г. В. С. Столбовой*, А. М. Гребенников, В. А. Холодов,
П. М. Шилов, Ю. А. Духанин**

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

*Поступила в редакцию 11.04.2025, после доработки 30.08.2025,
принята к публикации 16.09.2025*

Резюме: Биомасса гумусообразования является важным звеном в национальной модели управления бюджетом углерода. Целью исследования было определить допустимость замещения метода определения биомассы гумусообразования, представленной массой вещества в методе ЦИНАО, на подход фракционирования вещества (урожай, корневые и пожнивные остатки, побочная продукция), применяемый в методе РосНИИземпроекта. Сопоставлялись массы вещества гумусообразования, полученные разными методами, а также рассчитанные на их основе балансы гумуса (БГ). Использовались стандартные методы регрессионного и корреляционного анализа, а также метод разности пар между сопряженными последовательностями. Качество регрессионных моделей оценивалось по критерию Фишера. Исследование подтвердило допустимость замещения определения биомассы гумусообразования в методе ЦИНАО на подход, принятый в методе РосНИИzemпроект. На основе расчетов биомассы гумусообразования выявлено, что все полученные БГ последовательно повышались, следуя увеличению урожайности озимой пшеницы. Показано, что максимальные значения БГ (13.6 ц/га) получены для высокого среза соломы по методике ЦИНАО. Снижение урожайности (25 ц/га или средневзвешенное по региону 23.9 ц/га) формирует отрицательный БГ в технологиях производства зерна, где солома убирается в качестве побочного продукта. В технологиях, где солома входит в состав гумусообразующей биомассы, значение урожайности, ниже которого БГ становится отрицательным, снижается до урожайности 20 ц/га или 18.3 ц/га соответственно. Отмеченные значения урожайности служат критериями целесообразности организации почвенно-климатических проектов на пахотных почвах. Очевидно, что цель накопления гумуса (углерода) в пахотных почвах не будет достигнута под культурами, демонстрирующими отрицательный БГ. Урожайность, ниже которой инициировать почвенно-климатический проект нецелесообразно, предложено называть: “порог инициации почвенно-климатического проекта (ПИПКП)”.

Ключевые слова: климатический проект; порог инициации почвенно-климатического проекта; почвенное органическое вещество; моделирование.

Biomass of humus formation in the national model of carbon budget management in soils of agroecosystems

© 2025 V. S. Stolbovoy^{*}, A. M. Grebennikov, V. A. Kholodov,
P.M. Shilov, Yu.A. Dukhanin

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

Received 11.04.2025, Revised 30.08.2025, Accepted 16.09.2025

Abstract: Biomass of humus formation is an important part in a national carbon budget management model. The purpose of the study was to determine the acceptability of replacing the method of determining the biomass of humus formation, represented by the mass of matter in the method of CINAO to the approach of substance fractionation (crop, root and crop residues, by-products) used in the method of RosNIIzemprojekt. The masses of humus-forming matter obtained by different methods were compared, as well as the humus balances (HB) calculated for them. Standard methods of regression and correlation analysis were used, as well as the method of pair difference between conjugate sequences. The quality of regression models was assessed using the Cheddock scale. The study confirmed the acceptability of substituting the humus formation biomass determination in the CINAO method for the approach adopted in the method of RosNIIzemprojekt. Based on calculations of humus formation biomass, it was revealed that all calculated HBs consistently increased with increasing winter wheat yield. It is shown that the maximum HB values (13.6 c/ha) were obtained for high straw cutting according to the CINAO methodology. Reduced yield (25 c/ha or average area-weighted by the region 23.9 c/ha) forms a negative HB in grain production technologies that collect straw as a by-product. In technologies that include straw in the humus-forming biomass, the yield value below which the HB becomes negative decreases to a yield of 20 c/ha or 18.3 c/ha, respectively. The noted values of yields act as criteria for the feasibility of initiation of soil-climatic projects on arable soils. Obviously, the goal of humus (carbon) accumulation in arable soils will not be achieved under crops that demonstrate negative HB. Yields below which it is inappropriate to initiate a soil-climatic project are proposed to be called: “Soil-climatic project initiation threshold (SCPIT)”.

Keywords: climate project; soil organic matter; modeling; soil-climatic project initiation threshold.

ВВЕДЕНИЕ

В процессе развития национальной модели управления бюджетом углерода (БГ) в почвах агроэкосистем РФ (Столбовой и др., 2024) была изучена возможность адаптации принятых в РФ двух методов, применяемых для мониторинга плодородия сельскохозяйственных почв к решению задач климатических проектов. Один из этих методов был разработан РосНИИземпроектом (Крылатов и др., 1998), второй метод предложен ЦИНАО (Методические..., 2000). Было показано, что основное различие между этими методами состоит в подходах расчета минерализации гумуса. Согласно методу РосНИИzemпроекта (Крылатов и др., 1998), минерализация гумуса определяется опосредовано через потребность культур в азоте. В методе ЦИНАО (Методические..., 2000) этот показатель устанавливается непосредственно через значение почвенно-климатических условий, влияющих на минерализацию почвенного органического вещества (ПОВ). Изучение качества методов расчета БГ в почвах агроэкосистем выявило логическую ошибку в алгоритме расчета по методике РосНИИzemпроекта (Крылатов и др., 1998), согласно которой увеличение поступления растительных остатков в почву (биомассы гумусообразования) приводит к снижению содержания гумуса. Причиной такой ошибки в методике РосНИИzemпроекта (Крылатов и др., 1998) являются погрешности в оценке роли минерализации гумуса. Принято, что половина количества азота, необходимого для роста и развития сельскохозяйственных культур, растения берут из растительных остатков и удобрений, а другую половину – из гумуса почвы в результате его минерализации. При таком подходе на фоне повышения урожая, а следовательно, и увеличения биомассы гумусообразования в форме пожнивных и корневых остатков, опережающими темпами возрастает минерализация гумуса. Иными словами, получается, что чем больше в почву поступает растительных остатков, тем более дефицитным становится БГ. Эта логика противоречит существующим данным о процессах образования гумуса в почвах (Орлов, 1990). В качестве дополнительных контраргументов логике метода РосНИИzemпроекта (Крылатов и др., 1998) можно привести данные полевых опытов, в которых показано, что

в вариантах без внесения азотных удобрений в 4-польном севообороте (горохо-овсяная смесь, озимая рожь, картофель, ячмень) минерализация гумуса составила 4.8 ц/га, тогда как применение азотных удобрений в расчетных дозах оказывало на содержание гумуса стабилизирующее действие (Кириллова, Жуков, 2005). То есть авторами обнаружено, что внесение азотных удобрений практически полностью нивелировало потребность в органическом азоте. В другом исследовании представлен более сложный процесс потребления азота растениями (Смирнов, Муравин, 1984). Показано, что в полевых условиях растения усваивают непосредственно из удобрений лишь 30–50% азота. Однако при внесении азотных удобрений усиливается минерализация почвенного азота и его усвоение растениями. При этом 10–20% азота нитратных и 30–40% аммиачных, аммонийных удобрений и мочевины закрепляется в почве в органической форме.

Вместе с обнаружением ошибок выполненное ранее исследование (Столбовой и др., 2024) выявило различия учета биомассы гумусообразования в отмеченных методах. Так в методе РосНИИземпроекта (Крылатов и др., 1998) применяется фракционирование биомассы фотосинтеза на основную продукцию (урожай), побочную продукцию (солома), пожнивные и корневые остатки. В методе ЦИНАО (Методические..., 2000) биомасса фотосинтеза включает урожай культуры, а биомасса гумусообразования рассчитывается как величина производная от объема урожая без учета ее фракционного состава. Такой подход лишает возможности при помощи метода ЦИНАО (Методические..., 2000) исследовать зависимость гумусообразования от использования различных фракций растительного опада, т. е. изучать управление биомассой гумусообразования. Кроме того, метод не позволяет определить влияние качества биомассы гумусообразования на процессы гумификации.

Вместе с тем имеются сведения, что гумусообразование идет по-разному у подземных и надземных органов растений. Показано, что корни медленнее разлагаются по сравнению с соломой. Это связано с большим содержанием в корнях устойчивых органических соединений – лигнина и гемицеллюлозы – по сравнению с поверхностными частями биомассы. Кроме того, часть

отмерших корней фиксируется внутри агрегатов и формирует относительно устойчивое окклюдирующее ПОВ. Таким образом, в агроэкосистемах корневые остатки вносят существенный вклад в гумусообразование, а более легко разлагаемая солома является преимущественно источником органического азота и энергии для почвенных микроорганизмов (Кононова, 1963; Six et al., 2004).

Целью настоящей работы является исследование варианта замещения метода определения биомассы гумусообразования, который используется ЦИНАО (Методические..., 2000), на подход фракционирования биомассы гумусообразования, применяемый в методе РосНИИземпроекта (Крылатов и др., 1998).

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

В исследовании использованы данные, приведенные в работе В.С. Столбового (Столбовой и др., 2024). В целях сокращения размера таблиц субъекты РФ объединены в 9 классов по величине урожая озимой пшеницы (шаг 5 ц/га в диапазоне от < 15 до > 51 ц/га). Модели расчетов приведены для каждого метода (табл. 1) и иллюстрируют более детальный подход оценки биомассы в методе РосНИИzemпроекта (Крылатов и др., 1998) по сравнению с подходом в методе ЦИНАО (Методические..., 2000). Так, в методе РосНИИzemпроекта (Крылатов и др., 1998) по различным уравнениям регрессии рассчитывается побочная продукция (солома), количество пожнивных и корневых остатков в зависимости от уровня урожая озимой пшеницы. В методе ЦИНАО (Методические..., 2000) рассчитывается лишь количество биомассы гумусообразования путем умножения величины урожая озимой пшеницы на фиксированные коэффициенты, зависящие от уровня урожайности культуры.

Количество поступающей в почву биомассы гумусообразования при выращивании озимых зерновых существенно зависит от использования побочной продукции (соломы).

Таблица 1. Модели расчета фракций биомассы и биомассы гумусообразования (ц/га) для озимой пшеницы методами РосНИИземпроект (Крылатов и др., 1998) и ЦИНАО (Методические..., 2000)

Table 1. Models for calculation of biomass fractions and humus formation biomass (c/ha) for winter wheat by methods of RosNIIzemprojekt (Krylatov et al., 1998) and CINAO (Methodical..., 2000)

Урожайность	Фракции биомассы			Биомасса гумусообразования	
	Побочная продукция (солома)	Пожнивные остатки	Корневые остатки	Низкий срез соломы	Высокий срез соломы
РосНИИземпроект					
y	Пп	По	Ко		
10–25	1.7y+3.4	0.4y+0.6	0.9y+5.8	По+Ко	По+Ко+1/2Пп
26–40	0.8y+25.9	0.1y+8.9	0.7y+10.2		
ЦИНАО					
<10	H.o.*	H.o.	H.o.	1.8y	H.o.
10–30	H.o.	H.o.	H.o.	1.5y	H.o.
>30	H.o.	H.o.	H.o.	1.3y	H.o.

Примечание. *H.o. – не определяется.

Note. *H.o. – has not been calculated.

При низком срезе соломы¹ оставляется стерня длиной 10–12 см, при высоком – 30 и более см. В основном практикуется низкий срез соломы. Высокий срез используется при необходимости увеличить темпы уборки урожая, выраженного микрорельефа полей, устройстве снегозадержания. Негативным аспектом применения высокого среза соломы является увеличение потерь урожая. Условно будем считать, что стерня, оставляемая при высоком срезе, включает в себя корневые и пожнивные остатки, образующиеся при низком срезе, и половину побочной продукции (соломы) озимой пшеницы (табл. 1).

Поскольку БГ зависит от величины гумификации растительных остатков, то сделана попытка установления связи между БГ и различными величинами биомассы гумусообразования. С этой целью использовался регрессионный и корреляционный анализы.

Оценка значимости уравнения регрессии выполнена на основе t-критерия Стьюдента (Закс, 1976). Фактическое значение последнего, обозначаемое символом t_b , вычислялось для вариантов биомассы гумусообразования в пределах каждой группы урожая как отношение абсолютной величины коэффициента b к его стандартной ошибке (SE):

$$t_b = |b| / SE,$$

где

$$SE = \text{SQRT} (\text{SUM} (\text{БГфI} - \text{БГвI})^2 / (N - 1) \times (N - 2) \times \text{скоБ}),$$

где I = 1...N; БГфI – фактическое значение баланса гумуса для I-го класса урожайности озимой пшеницы; БГвI – значение баланса гумуса для I-го класса урожайности озимой пшеницы, вычисляемое по уравнению регрессии; N – число субъектов; скоБ – среднее квадратичное отклонение величины биомассы гумусообразования; SQRT – квадратный корень; SUM – знак суммы.

Качество уравнения регрессии устанавливалось по F-

Какая оптимальная высота среза при уборке зерновых?

URL: <https://direct.farm/post/kakaya-optimalnaya-vysota-sreza-pri-uborke-zernovykh-16898> (дата обращения 17.03.2025).

критерию Фишера, который позволяет оценить точность прогноза по уравнению регрессии в сравнении с прогнозом по среднему. Фактическое значение критерия Фишера в данном случае вычислялось по формуле (Закс, 1976):

$$F_{\text{факт}} = (R^2 / (1 - R^2)) \times (N - 2).$$

Сравнивая фактическое значение $F_{\text{факт}}$ и табличное $F_{\text{табл}}$ на уровне значимости равном 0.05 и числе степеней свободы 1 и $N - 2$ (N – число сравниваемых пар чисел), принимается решение:

- если $F_{\text{факт}}$ больше $F_{\text{табл}}$, то построенная модель “лучше” прогноза по среднему;
- если $F_{\text{факт}}$ меньше $F_{\text{табл}}$, то качество построенной модели сравнимо с точностью прогноза по среднему.

Оценена допустимость замещения определения биомассы гумусообразования в методике ЦИНАО (Методические..., 2000) на подход расчета фракций биомассы в методике РосНИИземпректа (Крылатов и др., 1998). С этой целью определялись различия между последовательностями баланса гумуса, рассчитанными по методике ЦИНАО (Методические..., 2000), и аналогичными последовательностями, полученными по методике РосНИИземпректа (Крылатов и др., 1998). Для оценки этих различий использовался метод разности пар между сопряженными последовательностями, в котором степень различия между этими последовательностями определялась по значению коэффициента Стьюдента (Закс, 1976). Расчеты проводились по формуле:

$$t_{\phi} = d / s_d = (\text{Sum } d_i) / n / \text{SQRT}(\sum d_i^2 - (\sum d_i)^2 / n) / \sqrt{n(n - 1)},$$

где d – разность между сопряженными парами данных в сравниваемых рядах значений; Sum – знак суммы; SQRT – знак корня квадратного; n – число пар в сравниваемых рядах.

При этом, если t_{ϕ} было больше соответствующего табличного значения, то различия между сравниваемыми последовательностями были существенными. В случае, когда t_{ϕ} меньше табличного значения, различия между последовательностями считались незначимыми.

Расчеты выполнялись в программной среде MATLAB 7.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Как следует из таблицы 2, величина биомассы гумусообразования, рассчитанная для низкого среза по методике РосНИИЗемпроекта (Крылатов и др., 1998), близка таковой, определенной для среднего взвешенного урожая методом ЦИНАО (Методические..., 2000). Соответственно, близкие значения получены и для величин БГ1 (традиционный ЦИНАО) и БГ2 (измененный низкий срез).

Оценка значимости различий значений БГ1 и БГ2 методом разности пар по t-критерию составила 0.435, что меньше табличного значения критерия Стьюдента при восьми степенях свободы, равного 2.31 при двустороннем уровне значимости 0.05. Следовательно, различия между данными БГ1 и БГ2 являются незначительными. Близкие значения величины БГ, на наш взгляд, подтверждают допустимость проведенного нами замещения данных определения биомассы гумусообразования в методе ЦИНАО (Методические..., 2000) на данные метода РосНИИЗемпроекта (Крылатов и др., 1998).

Установлено, что все три рассчитанных значения БГ (табл. 2) возрастают по мере увеличения урожайности озимой пшеницы. Величина БГ1 изменялась в диапазоне от минус 7.9 до плюс 8.5 ц/га, а Б2 – в интервале от минус 7.5 до плюс 6.5 ц/га. Наиболее высокие величины отмечены для варианта БГ3, которые находятся в диапазоне от минус 4.9 до плюс 13.6 ц/га. Таким образом, значения БГ1 и БГ2, которые формируются в результате уборки соломы как побочного продукта были существенно ниже по сравнению с соответствующими значениями БГ3, включающими солому в биомассу гумусообразования.

Величина БГ1 и БГ2 для первых трех классов урожайности (< 15, 16–20 и 21–25 ц/га) имеет отрицательные значения. Отрицательный БГ свидетельствует о том, что поступление новообразованного гумуса меньше величины его минерализации в почве. Последующие классы урожайности (26–30 ц/га и более) характеризуются положительными значениями БГ1 и БГ2. Положительный БГ демонстрирует, что поступление новообразованного гумуса больше величины его минерализации в почве.

Таблица 2. Биомасса гумусообразования и баланс гумуса в почвах РФ под посевами озимой пшеницы в 2022 г. (расчеты по методикам РосНИИземпроекта (Крылатов и др., 1998) и ЦИНАО (Методические..., 2000))

Table 2. Biomass of humus formation and humus balance in Russian soils under winter wheat in 2022 (calculations according to the methods of RosNIIzemprojekt (Krylatov et al., 1998) and CINAO (Methodical..., 2000))

Основная продукция (урожай), ц/га		РосНИИzemпроект						ЦИНАО		
		Корневые остатки, ц/га	Пожнивные остатки, ц/га	Побочная продукция (солома), ц/га	Биомасса гумусообразования, ц/га		Баланс гумуса, ц/га			
У	Уср	Ко	По	Пп	Ко+По +1/2Пп	Низкий срез со- ломы	Высокий срез со- ломы*	Расчет по вели- чине Уср	Традиционный (БГ1)	Измененный
<15	13.5	18.0	6.0	26.4	24.0	37.2	24.3	-7.9	-7.5	-4.9
16–20	18.3	22.3	7.9	34.5	30.2	47.5	27.5	-7.2	-6.2	-2.7
21–25	23.9	27.3	10.2	44.0	37.5	59.5	35.9	-0.9	-0.6	3.8
26–30	27.4	29.4	11.6	47.8	41.0	64.9	35.6	0.6	0.5	5.3
31–35	33.2	33.4	12.2	52.5	45.6	71.9	43.2	0.9	1.4	6.7

Продолжение таблицы 2

Table 2 continued

У	Уср	Ко	По	Пп	Ко+По +1/2Пп	РосНИИzemпроект		ЦИНАО		
						Корневые остатки, ц/га	Пожнивные остатки, ц/га	Побочная продукция (солома), ц/га	Биомасса гумусообразования, ц/га	Баланс гумуса, ц/га
Низкий срез со- ломы	Высокий срез со- ломы*	Расчет по вели- чине Уср	Традиционный (БГ1)	Низкий срез со- ломы (БГ2)	Высокий срез со- ломы (БГ3)					
36–40	39.7	38.0	12.9	57.7	50.9	79.8	51.6	2.9	2.8	8.6
41–45	41.2	39.0	13.0	58.9	52.0	81.5	53.6	3.2	2.9	8.8
46–50	47.5	43.5	13.7	63.9	57.2	89.2	61.8	6.3	5.3	11.7
> 51	56.6	49.8	14.6	71.2	64.4	100.0	73.6	8.3	6.5	13.6
Средневзвешенный по площади баланс гумуса по РФ							3.4	2.9	8.7	

Примечание. *биомасса побочной продукции при высоком срезе культур составляет $\frac{1}{2}$ таковой при низком срезе.

Note. * the biomass of by-products at high crop cut is $\frac{1}{2}$ of that at low cut.

Отметим, что верхняя граница интервала урожайности 21–25 ц/га, которая соответствует средневзвешенному по площади посевов в субъектах РФ урожаю 23.9 ц/га, является критичной для разделения участков возделывания зерновых с отрицательным и положительным БГ. На практике это означает, что организация почвенно-климатических проектов в целях накопления гумуса (углерода) в пахотных почвах нецелесообразна при урожае зерновых ниже 25 ц/га или при средневзвешенном по площади посевов в субъекте РФ урожае менее 23.9 ц/га.

В случае БГ3 отрицательные значения наблюдаются для первых двух классов урожайности (<15 и 16–20 ц/га). Последующие классы урожайности (21–25 ц/га и более) имеют положительные значения БГ. Иными словами, в технологиях выращивания зерновых с включением соломы в биомассу гумусообразования порог целесообразности организации климатического проекта снижается до верхней границы класса урожайности 16–20 ц/га или до средневзвешенного по площади посевов в субъекте РФ урожая 18.3 ц/га.

Отмеченные значения урожайности, ниже которой инициировать почвенно-климатический проект нецелесообразно, предлагается называть: “порог инициации почвенно-климатического проекта (ПИПКП)”. Очевидно, что цель накопления гумуса (углерода) в пахотных почвах не будет достигнута под культурами, демонстрирующими отрицательный БГ, т. е. организация почвенно-климатического проекта нецелесообразна. Введение критерия ПИПКП в качестве нормы целесообразности организации почвенно-климатических проектов на пахотных почвах позволит повысить эффективность инвестиций в почвенно-климатические проекты.

На рисунке 1 показано пространственное разнообразие биомассы гумусообразования и БГ. Карты демонстрируют четко выраженные региональные различия, а также иллюстрируют существенное варьирование рассматриваемых показателей в зависимости от используемой технологии уборки (традиционная технология, низкий или высокий срез соломы). Это свидетельствует о повышенной чувствительности БГ почв к региональным условиям гумусообразования и агротехнологиям производства сельскохозяйственных культур.

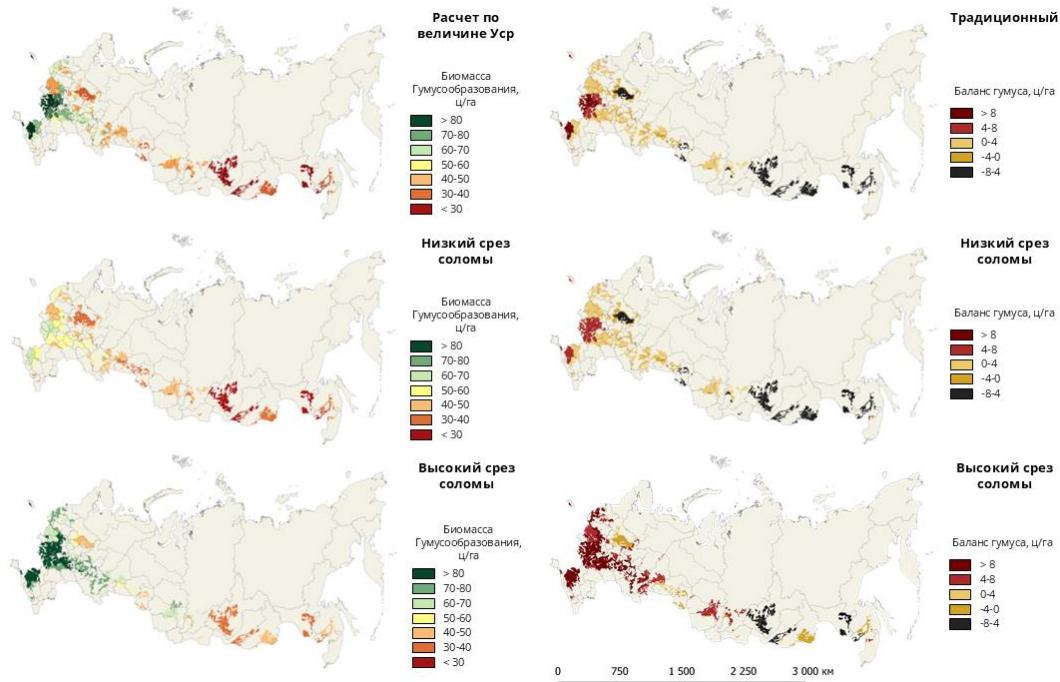


Рис. 1. Биомасса гумусообразования и баланс гумуса в почвах под зерновыми культурами в 2022 г.
Fig. 1. Humus formation biomass and humus balance in soils under grain crops in 2022.

Наибольшие значения биомассы гумусообразования (> 80 ц/га) и БГ (> 8 ц/га) характерны для почв Центрально-Черноземного и Предкавказского регионов, особенно при высоком срезе соломы. Минимальные показатели биомассы гумусообразования (30–40 ц/га и менее) и отрицательного или нейтрального БГ (от –8 до 0 ц/га) наблюдаются в почвах Сибири и Дальнего Востока. Таким образом, почвы Центрально-Черноземного и Предкавказского регионов обладают наибольшим потенциалом для управления гумусообразованием и БГ в целях климатических проектов.

Были рассчитаны регрессионные зависимости и оценено качество последних от величины биомассы гумусообразования для БГ1, БГ2, БГ3 (табл. 3).

Как видно из таблицы 3, все три БГ под озимой пшеницей, рассчитанные по соответствующим биомассам гумусообразования, образуют достоверные прямолинейные регрессионные зависимости. Судя по величинам коэффициентов корреляции, тесноту связи между всеми БГ и соответствующими биомассами гумусообразования, согласно со шкалой Чеддока, следует оценивать как очень высокую. При этом качество этих моделей выше в сравнении с прогнозом по среднему.

Качество моделей, рассмотренных в настоящей работе, оказалось более высоким по сравнению с качеством аналогичных моделей, полученных как по методике РосНИИЗемпроекта (Крылатов и др., 1998), так и ЦИНАО (Методические..., 2000), приведенных в работе В.С. Столбового (Столбовой и др., 2024).

Теснота коррелятивной связи БГ с биомассами гумусообразования для озимой пшеницы, рассчитанная в настоящей работе, была более высокой, в сравнении с аналогичными моделями, рассмотренными ранее (Столбовой и др., 2024).

Таблица 3. Оценка качества регрессионной зависимости балансов гумуса (БГ1, БГ2, БГ3) от биомассы гумусообразования (Б1, Б2, Б3 соответственно)

Table 3. Quality assessment of the regression relationship between humus balances (HB1, HB2, HB3) and humus formation biomass (B1, B2, B3, respectively)

Регрессионная зависимость БГ от различной биомассы гумусообразования	t-критерий Стьюдента		Коэффициент корреляции (R)		F-критерий Фишера	
	t факт. (tb = b /SE)	t табл.	R факт.	R крит.	F факт.	F табл.
БГ1=19.3-0.416×Б1	3.302	2.365	0.981	0.666	193.0	5.59
БГ2=-13.2+0.368×Б2	8.147	2.365	0.992	0.666	148.6	5.59
БГ3=-15.8+0.306×Б3	11.34	2.365	0.987	0.666	262.23	5.59

ВЫВОДЫ

Исследования подтвердили допустимость замещения определения биомассы гумусообразования, которая представлена величиной общей массы вещества в методе ЦИНАО (Методические..., 2000), на подход фракционирования биомассы гумусообразования, принятый в методе РосНИИЗемпроект (1998). Правомерность такого замещения подтверждена методом разности пар между сопряженными последовательностями, в котором степень различия между этими последовательностями определялась по значению коэффициента Стьюдента.

При установлении связи между рассматриваемыми биомассами гумусообразования и БГ было выявлено, что между этими показателями существуют достоверные прямолинейные регрессионные зависимости, имеющие очень тесную связь по шкале Чеддока. При этом качество регрессионных моделей оказалось выше в сравнении с прогнозом по среднему.

Из расчетов БГ по рассматриваемым биомассам гумусообразования следует, что значения БГ1, БГ2 и БГ3 последовательно возрастили по мере увеличения урожайности озимой пшеницы. Выявлено, что БГ1 и БГ2, рассчитанные для низкого среза соломы и ее сбора в качестве субпродукта, были отрицательными для первых трех классов урожайности (<15, 16–20 и 21–25 ц/га) и изменялись от минус 7.9 до плюс 8.5 ц/га и от минус 7.5 до плюс 6.5 ц/га соответственно. Показано, что БГ3, рассчитанный для высокого среза соломы и ее использования в качестве биомассы гумусообразования, был отрицательным только для двух первых классов урожайности (<15 и 16–20 ц/га). При этом БГ3 имел более высокие значения по сравнению с БГ1 и БГ2 и изменился в диапазоне от минус 4.9 до плюс 13.6 ц/га.

Пониженная урожайность (25 ц/га или средняя площадь-взвешенная по области 23.9 ц/га) формирует отрицательный БГ в технологиях (Б1, Б2) производства зерновых, использующих солому в качестве побочного продукта. В технологиях, включающих солому в биомассу гумусообразования, порог отрицательного БГ снижается до урожайности 20 ц/га или 18.3 ц/га (Б3) соответственно.

Отмеченные значения урожайности, ниже которой инициировать почвенно-климатический проект нецелесообразно, предложено называть: “порог инициации почвенно-климатического проекта (ПИПКП)”. Очевидно, что цель накопления гумуса (углерода) в пахотных почвах не будет достигнута под культурами, демонстрирующими отрицательный БГ, т. е. организация почвенно-климатического проекта нецелесообразна. Введение критерия ПИПКП в качестве нормы целесообразности организации почвенно-климатических проектов на пахотных почвах позволит повысить эффективность инвестиций в почвенно-климатические проекты.

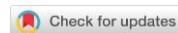
Применение методов статистики подтвердило наличие достоверных прямых связей между биомассой гумусообразования и балансом гумуса в почвах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Закс Л. Статистическое оценивание. М.: Статистика, 1976. 598 с.
2. Кириллова Г.Б., Жуков Ю.П. Содержание гумуса и доступных форм азота в почве в зависимости от различных доз удобрений // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. 2005. № 2. С. 3–9.
3. Крылатов А.К., Носов С.И., Юдицкий Б.А., Бондарев Б.Е., Первушина В.Н. Динамика баланса гумуса на пахотных землях Российской Федерации. М.: Госкомзем России. РосНИИземпроект, 1998. 49 с.
4. Методические указания по определению баланса питательных веществ азота, фосфора, калия, гумуса, кальция. М.: ЦНАО, 2000. 39 с.
5. Орлов Д.С. Гумусовые кислоты почв и общая теория гумификации. М.: Изд-во МГУ, 1990. 324 с.
6. Смирнов П.М., Муравин Э.А. Агрохимия. М.: Колос, 1984. 304 с.
7. Столбовой В.С., Гребенников А.М., Шилов П.М., Духанин Ю.А. Развитие национальной модели управления бюджетом гумуса (углерода) в почвах агростистем Российской Федерации // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2024. Вып. 120. С. 6–47. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2024-120-6-47>.
8. Kononova M.M. Soil organic matter. Its nature, its role in soil formation and in soil fertility. UK. Oxford: Pergamon, 1966. 544 p.
9. Six J., Bossuyt H., Degryze S., DeNef K. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics // Soil and Tillage Research. 2004. Vol. 79. P. 7–31.

REFERENCES

1. Zaks L., *Statisticheskoye otsenivaniye* (StatisticaStatistical estimation), Moscow: Statistica, 1976, 598 p.
2. Kirillova G.B., Zhukov Y.P., Soderzhaniye gumusa i dostupnykh form azota v pochve v zavisimosti ot razlichnykh doz udobreniy (Content of humus and available forms of nitrogen in soil depending on different doses of fertilizers), *Izvestia Timiryazevskaya agricultural academy*, 2005, No. 2, pp. 3–9.
3. Krylatov A.K., Nosov S.I., Yuditsky B.A., Bondarev B.E., Pervushina V.N., *Dinamika balansa gumusa na pakhotnykh zemlyakh Rossiiyiskoy Federatsii* (Dynamics of humus balance on arable lands of the Russian Federation), Moscow: Goskomzem Rossii, RosNIIzemproekt, 1998, 49 p.
4. *Metodicheskiye ukazaniya po opredeleniyu balansa pitatel'nykh veshchestv azota, fosfora, kaliya, gumusa, kal'tsiya* (Methodical guidelines for determining the balance of nutrients nitrogen, phosphorus, potassium, humus, calcium), Moscow: CINAO, 2000, 39 p.
5. Orlov D.S., *Gumusovyye kisloty pochv i obshchaya teoriya gumifikatsii* (Humus acids of soils and the general theory of humification), Moscow: Izd. of MSU, 1990, 324 p.
6. Smirnov P.M., Muravin E.A., *Agrochemistry*, Moscow: Kolos, 1984, 304 p.
7. Stolbovoy V.S., Grebennikov A.M., Shilov P.M., Dukhanin Yu.A., Towards a national model of humus (carbon) budget management in soils of agroecosystems in the Russian Federation, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2024, Vol. 120, pp. 6–47, DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2024-120-6-47>.
8. Kononova M.M., *Soil organic matter. Its nature, its role in soil formation and in soil fertility*, UK. Oxford: Pergamon, 1966, 544 p.
9. Six J., Bossuyt H., Degryze S., DeNef K., A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics, *Soil and Tillage Research*, 2004, Vol. 79, pp. 7–31.



Ссылки для цитирования:

Занилов А.Х. Влияние минеральных и органо-минеральных систем удобрения в Геосети многолетних опытов на формирование углеродного баланса в агроэкосистеме // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2025. Вып. 125. С. 157-180. DOI: 10.19047/0136-1694-2025-125-157-180

Cite this article as:

Zanilov A.H., The influence of mineral and organo-mineral fertilizer systems in the Geonet of long-term experiments on the formation of carbon balance in the agroecosystem, Dokuchaev Soil Bulletin, 2025, V. 125, pp. 157-180, DOI: 10.19047/0136-1694-2025-125-157-180

Благодарность:

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки РФ, mnemonic code FZZR-2023-0010.

Acknowledgments:

The work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, mnemonic code FZZR-2023-0010.

Влияние минеральных и органо-минеральных систем удобрения в Геосети многолетних опытов на формирование углеродного баланса в агроэкосистеме

© 2025 г. А. Х. Занилов

*Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, Россия,
360004, Кабардино-Балкарская Республика,
г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173.*

*Институт сельского хозяйства –
филиал Кабардино-Балкарского научного центра
Российской академии наук,*

*360024, Кабардино-Балкарская Республика, г. Нальчик, ул. Кирова, 224,
<https://orcid.org/0009-0002-8635-6501>, e-mail: amiran78@inbox.ru.*

*Поступила в редакцию 18.11.2024, после доработки 24.01.2025,
принята к публикации 16.09.2025*

Резюме: Целью работы являлась оценка влияния минеральной и органо-минеральной систем удобрения озимой пшеницы (2021–2024 гг.) в условиях степной зоны Кабардино-Балкарской Республики (Терский район, с. Опытное) на участке многолетних опытов, входящих в Геосеть (№ 037), на баланс парниковых газов (CO_2 и N_2O) в агроэкосистеме. Почва участка представлена черноземом обыкновенным мицеллярно-карбонатным. Расчет баланса диоксида углерода производился в соответствии с методическими рекомендациями Минприроды России (Приказ № 371 от 22.05.2022 г.). Объемы выбросов закиси азота определялись в соответствии с рекомендациями Межправительственной группы экспертов по изменению климата. Сопоставлением данных баланса CO_2 -экв. в агроэкосистеме и CO_2 -экв., соответствующего объему эмитированного N_2O , сформированного за счет содержащегося в растительных остатках и удобрениях азота, а также минерализуемого азота почвы, установлена наиболее благополучная с климатической точки зрения (углерод-секвестрирующая способность) система питания растений – органо-минеральная. Объем CO_2 -экв., накопленного в системе “почва–растение”, в среднем за 4 года при органо-минеральной системе удобрения составил 98.5 т/га и 28.7 т/га при минеральной системе. Данные показатели отражают разницу углеродного баланса по отношению к контрольному варианту, в котором не использовались какие-либо удобрения. Основной сток CO_2 обеспечивался накоплением органического вещества в почве как в пахотном, так и подпахотном горизонтах (0–40 см). При органо-минеральной системе накопление углерода в почве составило 25.2 т/га (92.2 т/га CO_2 -экв.), при минеральной – 7.3 т/га, или 26.7 т/га CO_2 -экв.

Ключевые слова: минеральные удобрения; органические удобрения; парниковые газы; углеродный баланс; Геосеть многолетних опытов; климатический проект.

The influence of mineral and organo-mineral fertilizer systems in the Geonet of long-term experiments on the formation of carbon balance in the agroecosystem

© 2025 A. Kh. Zanilov

*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
“Kabardino-Balkarian State University named after H. M. Berbekov”,
173 Chernyshevsky Str., Nalchik 360004,
Kabardino-Balkarian Republic, Russian Federation.*

*The Institute of Agriculture – a branch of the Kabardino-Balkarian
Scientific Center of the Russian Academy of Sciences,
224 Kirov Str., Nalchik 360024,
Kabardino-Balkarian Republic, Russian Federation,
<https://orcid.org/0009-0002-8635-6501>, e-mail: amiran78@inbox.ru.*

Received 18.11.2024, Revised 24.01.2025, Accepted 16.09.2025

Abstract: The purpose of the work was to assess the effect of mineral and organo-mineral fertilizer systems on the balance of greenhouse gases (CO_2 and N_2O) in the agroecosystem while winter wheat producing. The experiment was conducted 2021–2024 in the steppe zone of the Kabardino-Balkarian Republic (Tersky District, Optynoye Village) on a site of long-term experiments included in the Geosystem (No. 037). The soil of the site is represented by ordinary micellar-carbonate chernozem. The calculation of the carbon dioxide balance was carried out in accordance with the methodological recommendations of the Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation (Order No. 371 dated May 22, 2022). The volumes of nitrous oxide emissions were determined in accordance with the recommendations of the Intergovernmental Panel on Climate Change. By comparing the $\text{CO}_2\text{-eq}$ balance data in the agroecosystem and the $\text{CO}_2\text{-eq}$ corresponding to the amount of N_2O emitted from the nitrogen contained in plant residues and fertilizers, as well as the mineralizable nitrogen in the soil, the most climate-friendly (carbon sequestration capacity) system was identified. The average amount of $\text{CO}_2\text{-eq}$ accumulated in the “soil–plant” system over 4 years under the organo-mineral fertilizer system was 98.5 t/ha, compared to 28.7 t/ha under the mineral system. These figures reflect the difference in carbon balance compared to the control option, which did not use any fertilizers. The main absorber of CO_2 was the soil, both in the topsoil and in the subsoil (0–40 cm). In the organic-mineral system, the accumulation of carbon in the soil was 25.2 t/ha (92.2 t/ha $\text{CO}_2\text{-eq}$). In the mineral system, it was 7.3 t/ha or 26.7 t/ha $\text{CO}_2\text{-eq}$.

Keywords: mineral fertilizers; organic fertilizers; greenhouse gases; carbon balance; long-term experiments; Geonet.

ВВЕДЕНИЕ

Климатическая повестка, призванная снизить антропоген-

ные выбросы парниковых газов стала одним из ключевых катализаторов технологических преобразований в мировой экономике. Несмотря на наличие противоположных взглядов на происхождение парниковых газов, факт роста их концентрации в атмосфере не вызывает сомнений ни у одной из сторон дискуссии, а темпы распространения механизмов углеродного регулирования и формирования соответствующей нормативно-правовой основы свидетельствуют о прохождении точки невозврата к привычной экономической модели развития.

Для повышения конкурентоспособности отечественной сельскохозяйственной продукции на международных рынках рекомендуется озабочиться сокращением выбросов парниковых газов, четверть из которых приходится на сельское хозяйство (Gebrewahid, 2018) и модернизировать современное агропроизводство за счет внедрения углероднакопительных технологий (Столбовой, 2024).

Ключевыми факторами, формирующими углеродный след продукции растениеводства, считается дегумификация плодородного слоя почвы, сопровождающаяся чрезмерными выбросами диоксида углерода в атмосферу и нерациональное использование азотсодержащих синтетических и натуральных удобрений, ответственных за выбросы закиси азота. Оценка полного цикла производства зерновых культур показывает, что на долю минеральных удобрений может приходиться до 25% общего углеродного следа (Абдо, 2024), а в структуре углеродного следа конечного продукта (1 кг пшеничного хлеба) доля минеральных удобрений может достигать 15% (Башкин, 2024).

Учитывая прогнозы роста численности населения и во избежание образования глобального дефицита продовольствия, при традиционной системе земледелия в краткосрочной перспективе нельзя отказаться от использования минеральных удобрений, обеспечивающих, по данным мировой статистики, 40% прироста производства агропродукции (Save, Grow, 2011). Альтернативная же система земледелия в России – органическая, не допускающая использования синтетических средств производства, – находится на начальной стадии своего формирования, занимая не более 1.2% (~1 млн га) от всей площади сельскохозяйственных земель Рос-

сийской Федерации.

Выходом из сложившейся ситуации может быть создание агроэкологически, экономически и климатически обоснованных систем земледелия, преимущественно в части оптимизации систем питания культурных растений. Это позволит, с одной стороны, вести экономически эффективную производственную деятельность, стабилизировать получение более высоких урожаев с возможностью компенсации 30–40% потерь углерода почвами (Романенков, 2011) и снизить эмиссию N_2O при использовании азотных удобрений. В зависимости от вида и доз азотсодержащих удобрений эмиссионный фактор (ЭФ_{N_2O}) может превышать 1.5–2.0% (Charles, 2017) при установленном МГЭИК усредненном значении 1% (Klemedtsson, 1997).

В настоящее время системные исследования эффективности различных видов и доз удобрений проводятся на участках многолетних наблюдений, входящих в единую географическую сеть. Геосеть опытов с удобрениями была утверждена приказом Наркомзема СССР № 18 от 14 января 1941 г. (Романенков, 2012).

Значение длительных экспериментов в последнее время подвергается переосмыслению, что связано не только с изменением экономических факторов (диспаритет цен на минеральные удобрения и зерно), но и с актуализацией климатической проблематики и возрастающей ролью почвенных ресурсов как компонента агроэкосистем с высоким потенциалом поглощения парниковых газов (Сычев, 2022; 2021). Переход к биосферной парадигме природопользования (Кирюшин, 2023) в России соответствует общемировому тренду (Paustian, 2000; Körshens, 2018).

При оценке климатического воздействия отрасли сельского хозяйства инвентаризации подлежат в основном источники выбросов двух парниковых газов – диоксида углерода (CO_2) и закиси азота (N_2O), обладающие различным потенциалом глобального потепления (ПГП). Потенциал глобального потепления 1 кг диоксида углерода используется в качестве эталонного значения и равен единице. Концентрация закиси азота в атмосфере в 1 200 раз ниже, чем углекислого газа (WMO, 2019), но его ПГП в 298 раз (IPCC, 2013), по другим данным (Hanson, 1996), в 310 раз выше, что подчеркивает актуальность задач по осуществлению монито-

ринга его выбросов. Вклад N_2O в парниковый эффект оценивается в 6% (WMO, 2019). В силу необходимости обеспечения населения планеты продовольствием прогнозируется рост выбросов парниковых газов, связанных с увеличением доз минеральных азотных удобрений (Кудеяров, 2020). Анализ данных в отдельных регионах страны подтверждает сохранение тенденций увеличения объемов используемых минеральных удобрений (Завалин, 2023).

Целью исследования являлась оценка климатической целесообразности использования рекомендуемых доз минеральных и органо-минеральных удобрений в условиях естественного влагообеспечения на экспериментальном участке, входящем в Геосеть многолетних опытов.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводились на стационаре № 037 (Институт сельского хозяйства КБНЦ РАН, г. Нальчик), входящем в географическую сеть многолетних опытов, заложенных в 1947–1948 гг. Простаковым П.Е. для изучения влияния различных систем удобрения и орошения на динамику пищевого и водного режимов почвы, а также продуктивность пашни (рис. 1).

Почва участка классифицировалась как чернозем обыкновенный мицеллярно-карбонатный, тяжелосуглинистый, иловато-пылеватый. Содержание гумуса на момент закладки опыта составляло 3.50–3.65%, валовый запас азота, фосфора и калия в пахотном горизонте находился в пределах 0.20–0.28%; 0.13–0.19% и 2.00–2.50% соответственно (Фиапшев, 1971).

Севооборот участка 10-польный, пространственно-временной и сформирован 4 культурами (табл. 1).

Исследования проводились на озимой пшенице, занимающей в севообороте место после люцерны 2-го года посева. Период исследований – 2021–2024 гг. Рекомендованные системы удобрения представлены в таблице 2.

Расчеты по оценке влияния систем удобрения на выбросы парниковых газов в случае с диоксидом углерода проводились с использованием формул, утвержденных Приказом Минприроды России № 371 от 27.05.2022 г. “Об утверждении методик количественного определения объемов выбросов парниковых газов и по-

глощений парниковых газов” (Приказ МПР).

Для оценки баланса CO₂ в системе “почва–растение” учитывался депонированный объем углерода в товарной части продукции. Разница значений CO₂, эквивалентных объему органического вещества почвы в сравниваемых вариантах, использовалась для конечной климатической оценки рассматриваемых систем удобрения озимой пшеницы.

$$\Delta C_{\text{мин.}} = (C_{\text{fert}} + C_{\text{plant}}) - C_{\text{resp}}, \quad (1)$$

где: **ΔC_{мин.}** – изменения запасов углерода в пуле почвенного углерода, тонн С в год;

C_{fert} – поступление углерода с органическими и минеральными удобрениями при фотосинтезе, тонн С в год;

C_{plant} – поступление углерода с растительными остатками, тонн С в год;

C_{resp} – потери почвенного углерода с дыханием почв, тонн С в год.

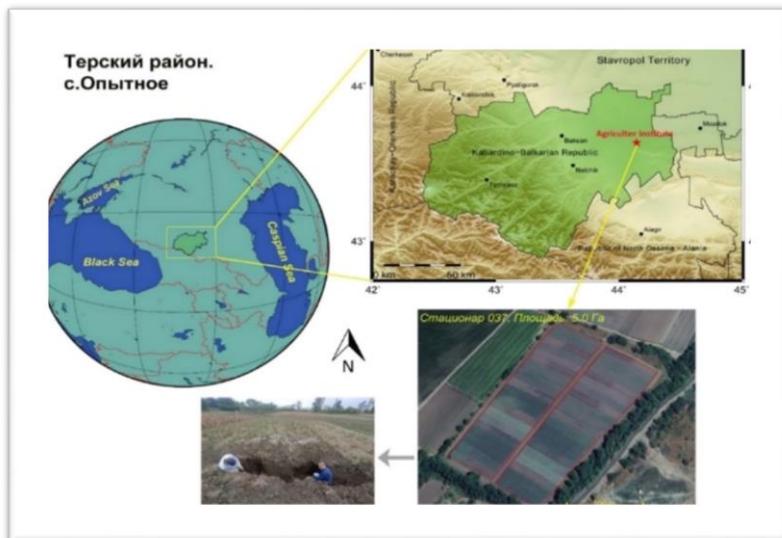


Рис. 1. Месторасположение опытного участка Геосети № 037.
Fig. 1. Location of Geoset experimental site No. 037.

Таблица 1. Ротационная таблица севооборота. Стационар № 037
Table 1. Crop rotation on experimental site No. 037

Годы	Номер поля									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2018	Л1	О.п.	К	К	О.п.	П	К	К	О.п.	Л2
2019	Л2	Л1	О.п.	К	К	О.п.	П	К	К	О.п.
2020	О.п.	Л2	Л1	О.п.	К	К	О.п.	П	К	К
2021	К	О.п.	Л2	Л1	О.п.	К	К	О.п.	П	К
2022	К	К	О.п.	Л2	Л1	О.п.	К	К	О.п.	П
2023	П	К	К	О.п.	Л2	Л1	О.п.	К	К	О.п.
2024	О.п.	П	К	К	О.п.	Л2	Л1	О.п.	К	К
2025	К	О.п.	П	К	К	О.п.	Л2	Л1	О.п.	К
2026	К	К	О.п.	П	К	К	О.п.	Л2	Л1	О.п.
2027	О.п.	К	К	О.п.	П	К	К	О.п.	Л2	Л1

Примечание. Л1 – люцерна 1-го года, Л2 – люцерна 2-го года, К – кукуруза, О.п. – озимая пшеница.

Note. Л1 – 1st year alfalfa, Л2 – 2nd year alfalfa, К – corn, О.п. – winter wheat.

Таблица 2. Рекомендуемая система удобрения озимой пшеницы, кг/га
Table 2. Recommended fertilization system for winter wheat, kg/ha

Контроль	Навоз, т/га	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
Минеральная				
-	-	90	90	60
Органо-минеральная				
-	10	60	60	30

Переменные в выше приведенной формуле, в свою очередь, вычисляются с использованием соответствующих коэффициентов:

$$C_{fert} = \sum_i (Opr_i \times Copr_i) + \sum_j (Min_j \times Cmin_j), \quad (2)$$

где: **Cfert** – поступление С с органическими и минеральными удобрениями, тонн С в год;

Oрг_i – количество органических удобрений в расчете на физический вес (*i* – вид удобрений), тонн в год;

Cорг_i – содержание углерода в сыром веществе органических удобрений (*i* – вид удобрений), тонн С/тонн органического удобрения (*содержание углерода в сыром веществе подстилочно-го навоза соответствует 12.07%*);

Мин_j – количество минеральных удобрений (*j* – вид минеральных удобрений), тонн действующего вещества минеральных удобрений в год;

Смин_j – содержание углерода в разных видах минеральных удобрений, тонн С/тонн действующего вещества минеральных удобрений (коэффициенты для расчета содержания углерода в азотных, фосфорных и калийных удобрениях равны 0.130; 0.015 и 0.017 соответственно).

$$C_{\text{plant}} = C_{\text{ab}} + C_{\text{un}}, \quad (3)$$

где: **Cab** и **Cun** – масса углерода, поступающего в почвы с пожнивными и корневыми остатками культурных растений определенного вида, тонн С в год.

Расчет количества углерода, поступающего в почву с растительными остатками, проводится с использованием дифференцированных коэффициентов по уровню урожайности озимой пшеницы по формулам, представленным в таблице 3.

$$C_{\text{resp}} = \sum i (Area_i \times AC_{CO_2i} \times Veg \times 0.6 \times 1.43) / 100 \times 12/44, \quad (4)$$

где: **Cresp** – потери почвенного углерода с дыханием почв, тонн С в год;

Area_i – площадь соответствующего типа почв пахотных земель, га;

AC_{CO₂i} – средний коэффициент по дыханию микрофлоры почвы пахотных земель, мг CO₂ в час (среднее значение по всем типам почв принято 204 мг CO₂/м²/ч);

Veg – продолжительность вегетационного периода, часы (в Кабардино-Балкарской Республике Veg равен 5 124 ч.);

0.6 – коэффициент для исключения дыхания корней;

1.43 – коэффициент для включения в расчет дыхания почв в течение холодного периода года;

12/44 – коэффициент для пересчета из единиц CO_2 в углерод.

Таблица 3. Масса поступающего с растительными остатками углерода, ц/га

Table 3. Carbon mass supplied with plant residues, centner/ha

Урожайность, ц/га	Пожнивные остатки	Корневые остатки
10–25	= $(0.4 \times Y + 2.6) \times 48.5/100$	= $(0.9 \times Y + 5.8) \times 48.5/100$
26–40	= $(0.1 \times Y + 8.9) \times 48.5/100$	= $(0.7 \times Y + 10) \times 48.5/100$

Расчеты выбросов закиси азота проводились в соответствии с рекомендациями Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) с использованием усредненных значений коэффициента эмиссионного фактора ($\text{ЭФ}_{\text{N}_2\text{O}}$), равное 0.0126. Данный коэффициент оказался ниже коэффициента, рекомендованного Минприроды России (Методические рекомендации, 2015), и выше коэффициента, дифференцированного с учетом возделываемых культур (Кудеяров, 2011; Завалин, 2023).

Методика позволяет оценить выбросы N_2O , связанные с использованием минеральных и органических удобрений, а также образовавшиеся в результате деструкции органического вещества почвы под влиянием ее механизированной обработки. Данная методика пригодна для проведения сравнительных оценок климатического влияния различных агротехнических приемов и почвоудобрительных средств. Формула расчета годовых прямых выбросов представлена в методиках (Методические рекомендации, 2015):

$$\text{N}_2\text{O} - \text{N}_{\text{поступл.}} = (\text{F}_{\text{SN}} + \text{F}_{\text{ON}} + \text{F}_{\text{CR}} + \text{F}_{\text{SOM}}) \times \text{EF}_1, \quad (5)$$

где: $\text{N}_2\text{O} - \text{N}_{\text{поступл.}}$ – общее поступление закиси азота в атмосферу, кг в год;

F_{SN} – годовое количество азота минеральных удобрений,

внесенных в почвы, кг N/год;

F_{ON} – годовое количество азота навоза, внесенного в почвы, кг N/год;

F_{CR} – годовое количество азота в растительных остатках (надземных и подземных) культурных растений, в том числе от азотфикссирующих культур, кг N/год (расчет по формулам, приведенным в табл. 3);

F_{SOM} – годовое количество азота в минеральных почвах, которое минерализуется в связи с потерей углерода из почвенного органического вещества в обрабатываемых почвах, кг N/год (по умолчанию используется коэффициент для всех полей, равный 30 кг N/га).

EF_1 – коэффициент выбросов N_2O от антропогенного внесения азота в почвы, кг N_2O – N/кг поступающего N (0.0126).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализируемые в исследовании системы удобрения в различной степени повлияли на урожайность озимой пшеницы, что в итоге сказалось и на балансе парниковых газов (табл. 4).

Из произведенных расчетов в таблице видно, что суммарное поступление углерода в почву зависело от системы удобрения и урожайности озимой пшеницы. Так, минеральная система удобрения способствовала накоплению в почве 2.18 т/га углерода, что больше, чем в контрольном варианте, на 17.1% (0.32 т/га). Органо-минеральная система обеспечивала поступление 3.38 т/га, что выше на 80.7% (1.21 т/га).

В используемых методических рекомендациях потери органического углерода (*Cresp*) оцениваются с применением справочных данных без дифференциации по используемым системам удобрения. Расчеты показали, что с учетом рассматриваемых статей поступления и потеря углерода при производстве зерна озимой пшеницы отрицательный баланс сложился в контрольном варианте (-0.58т/га) и в меньшей степени в варианте с минеральной системой удобрения (-0.26 т/га). Органо-минеральная система обеспечивала накопление 0.93 т/га углерода.

Таблица 4. Изменение запасов углерода в пуле почвенного углерода, т/га в год

Table 4. Change in carbon stocks in the soil carbon pool, t/ha per year

Система удобрения	Cfert, т/га				*Cplant, т/га		Cfert + Cplant	Cresp, т/га	$\Delta C_{\text{мин}}$			
	N		P ₂ O ₅	K ₂ O	По- жнив- ные	Кор- невые						
	Орг.	Мин.										
Контроль	-	-	-	-	0.57	1.3	1.87	2.45	-0.58			
Минеральная	-	0.12	0.014	0.01	0.57	1.48	2.19	2.45	-0.26			
Органо-минер.	1.21	0.08	0.01	0.005	0.58	1.49	3.38	2.45	+0.93			

Для оценки конечного углеродного баланса, сформировавшегося при производстве озимой пшеницы, полученные данные необходимо сопоставить с изменившимся объемом углерода в почве (табл. 5) и накопленным в товарной части урожая.

Конечный углеродный баланс оценивается по формуле:

$$\Delta C_{общ} = (C_{гумус} + C_{урожай}) + \Delta C_{мин}, \quad (6)$$

где: $\Delta C_{общ}$ – окончательный углеродный баланс, тонн С в год;

$C_{гумус}$ – содержание углерода в общем запасе гумуса, т/га;

$C_{урожай}$ – масса углерода, аккумулированного в товарной части урожая, т/га;

$\Delta C_{мин}$ – изменение запасов углерода в пуле почвенного углерода, т/га. (табл. 4).

Расчет, проведенный по представленной формуле, говорит о возрастающем влиянии системы удобрения на формирование углеродного баланса в агроэкосистеме. Для демонстрации влияния почвоудобрительных средств в таблице 6 приведены данные об изменении содержания почвенного углерода в профиле 0–40 см. Академик В.Р. Вильямс отмечал, что никакой прогресс в сельскохозяйственном производстве не мыслим при мощности пахотного слоя менее 20 см (Баздырев, 2023).

Целесообразность учета запаса углерода в более глубоких горизонтах связана со способностью почв к секвестрации углерода не только повышением относительного содержания органического вещества в почве, но и увеличением гумусового горизонта почвы. В абсолютном выражении с учетом запаса углерода в профиле 0–40 см под действием минеральных и органо-минеральных удобрений формируется его положительный баланс – 7.94 т/га и 27.03 т/га соответственно.

Особенностью расчетов объемов закиси азота как парникового газа является то, что в формулы закладываются только показатели эмиссии N_2O (табл. 7), несмотря на наличие научных данных, свидетельствующих о способности почвы поглощать закись азота (Климова, 2019).

Таблица 5. Запасы С, накопленного в органическом веществе почвы и в товарной части урожая, т/га
Table 5. Carbon accumulated in soil organic matter and in the commercial part of the crop, t/ha

№	Фон	Горизонт, см	Органическое ве-щество, %	Плотность, г/см ³	Масса ОВ, т/га	Масса С, т/га	Масса С в горизонте 0–40 см, т/га	Урожайность, т/га	Масса С в урожае, т/га
1	Без удобрений	0–20	2.47	1.19	58.8	34.1	70.4	2.28	1.11
		20–40	2.56	1.22	62.5	36.3			
2	Рекомендуемая минеральная система	0–20	2.93	1.19	69.7	40.4	77.7	2.94	1.43
		20–40	2.70	1.20	64.3	37.3			
3	Рекомендуемая органо-минеральная система	0–20	3.79	1.18	89.4	51.9	95.6	2.95	1.43
		20–40	3.11	1.21	75.3	43.7			

Примечание. НСР_{0.5} по горизонту 0–20 см – 0.26, по горизонту 20–40 см – 0.19.

Note. The smallest average difference (0.5) in 0–20 cm layer is 0.26, in 20–40 cm layer – 0.19.

Таблица 6. Баланс углерода с учетом его содержания в органическом веществе почвы и в урожае, тонн С в год
Table 6. Carbon balance taking into account its content in soil organic matter and in the crop yield, tons of C per year

№	Фон	Слой почвы, см	Масса С в почве, т/га	Масса С в урожае, т/га	$C_{гумус} + C_{урожай}$	$\Delta C_{мин}$	$\Delta C_{общ}$, т/га
1	Без удобрений	0–40	70.4	1.11	71.51	-0.58	70.93
3	Минеральная система	0–40	77.7	1.43	79.13	-0.26	78.87
5	Органо-минеральная система	0–40	95.6	1.43	97.03	+0.93	97.96

Отсутствие статьи поглощения может быть связано либо с незначительным количеством поглощенной закиси азота, которым в расчетах можно пренебречь, либо с методологическими сложностями при определении ее поглощения.

Таблица 7. Влияние систем удобрения на поступление в атмосферу N_2O -N, кг/га

Table 7. The impact of fertilization systems on atmospheric emissions of N_2O -N, kg/ha

№	Фон	F_{ON}	F_{SN}	$*F_{CR}$	F_{SOM}	EF_1	N_2O - N _{но-} ступл.
1	Без удобрений	-	-	17.1	30	0.0126	0.59
3	Рекомендуемая минеральная система	-	90	19.1	30	0.0126	1.75
5	Рекомендуемая органо-минеральная система	45	60	19.2	30	0.0126	1.94

Примечание. * – содержание азота в растительных остатках рассчитывалось, исходя из сформировавшейся биомассы и концентрации азота в них, равной 0.45%.

Note. * – the nitrogen content of plant residues was calculated based on the formed biomass and the nitrogen concentration in them, equal to 0.45%.

Вклад удобрений в поступление закиси азота в атмосферу оказался более существенным, чем вклад суммы N_2O , формирующегося из азота, находящегося в растительных остатках, и минерализованного органического вещества почвы. Рекомендованные минеральная и органо-минеральная системы удобрения повлияли на поступление 1.75 и 1.94 кг/га закиси азота в атмосферу, что больше, чем в контрольном варианте, на 197 и 228% соответственно.

Сопоставлением полученных данных по накопленному углероду в системе “почва–растение” (CO_2 -экв. высчитывается с ис-

пользованием коэффициента 3.66) и по выбросу закиси азота (CO_2 -экв. высчитывается с использованием коэффициента ПГП = 298) можно провести сравнительную оценку климатического влияния исследуемых систем удобрения (табл. 8). Для этого данные контрольного варианта используются в качестве базовых значений, по отношению к которым будет производиться оценка.

Полученные в результате расчетов данные свидетельствуют о влиянии минеральных удобрений и их сочетания с органическими на возможность ведения более благополучного с климатической точки зрения земледелия. При этом органо-минеральная система способствует накоплению CO_2 -экв. в агроэкосистеме в 3.4 раза больше по сравнению с использованием только минеральных удобрений.

Максимальная эффективность органо-минеральной системы удобрения ранее была установлена основателем отечественной школы агрохимии Д.Н. Прянишниковым (Прянишников, 1929) и подтверждена экономическими расчетами (Глуховченко, 2019).

В современных условиях глобальной переоценки значимости промышленных технологий задачи достижения устойчивости земледелия актуализируются в свете климатической парадигмы, что должно быть учтено и российским АПК.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрение статей углеродного баланса в системе “удобрение–почва–растение” с использованием методик Минприроды России и рекомендаций МГЭИК свидетельствует о преемущественной роли почвы как о резервуаре углерода, на долю которого в общей системе “почва–растение” приходится 84.7% секвестрированного диоксида углерода при минеральной системе и 95% – при органо-минеральной системе удобрения.

Учет в изменении содержания органического вещества почвы в глубоких горизонтах позволяет дать более объективную оценку климатической целесообразности использования различных систем удобрения. Это подтверждается увеличением запасов гумуса в почвенном горизонте до 40 см.

Таблица 8. Итоговый расчет баланса CO₂-экв., сформированного под влиянием систем удобрения
Table 8. Final calculation of the CO₂-eq balance formed under the influence of various fertilization systems

№	Фон	ΔСобщ,			N ₂ O-N _{поступл.}			$\Delta C_{общ} \cdot N_2O \cdot N_{поступл.}$
		т/га	Накопление, т/га	CO ₂ -экв	кг/га	Накопление, кг/га	CO ₂ -экв., т/га	
1	Без удобрений	70.93	-	-	0.59	-	-	-
3	Рекомендуемая минеральная система	78.87	7.94	29.06	1.75	1.16	0.346	28.71
5	Рекомендуемая органо-минеральная система	97.96	27.03	98.93	1.94	1.35	0.402	98.53

При этом научного внимания заслуживает особенность методики Минприроды России, в которой вклад дыхания почвы рассматривается в качестве потока CO₂, в то время как в научной литературе изобилует информация о тесной корреляционной зависимости дыхания почвы с содержанием в ней органического вещества.

Несмотря на отдельные противоречия в методологии расчетов, полученные данные с их использованием могут быть полезны при разработке почвенно-климатических проектов, где в качестве базовой линии рассматриваются консервативные способы земледелия, а проектный сценарий, в свою очередь, предусматривает модификацию системы питания культурных растений посредством включения в нее органических удобрений.

Подтверждение климатической целесообразности сочетания минеральных и органических удобрений наряду с их положительным влиянием на агроэкологические и экономические параметры производства позволяет рассматривать данную систему в качестве универсального приема для достижения устойчивости земледелия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдо Ай, Сунь Да, Янг К., Ли У., Ши З., Абдалла В.Е., Эль-Собки ЕАОС, Вэй Х., Чжан Дж., Кузяков Ю. Углеродный след синтетического азота под основными культурами: первый анализ от начала до конца // Глобальная биология. 2024. № 30(4). e17277. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.17277>.
2. Башкин В.Н. Эмиссия парниковых газов как мера энергоэффективности при оценке жизненного цикла удобрений // Жизнь Земли. 2024. Т. 46. № 1. С. 20–32.
3. Базырев Г.И., Лошаков В.Г., Пупонин А.И., Рассадин А.Я., Сафонов А.Ф., Туликов А.М. Земледелие. М.: Изд-во “Колос”, 2000. 549 с.
4. Глуховченко А.Ф. Агрохимическое обоснование продуктивности кукурузы на зерно при разных дозах удобрений и способах обработки почвы: Дис. ... к. с.-х. н. Белгород, 2019. 166 с.
5. Завалин А.А., Духанина Т.М., Такаева М.А. Оценка эмиссии закиси азота в земледелии Чеченской Республики // Плодородие. 2023. № 1. С. 34–39.
6. Кирюшин В.И. Задачи и программа научно-инновационного обеспечения земледелия и землепользования (методические

- рекомендации). М.: ООО “Издательство МБА”, 2023. 96 с.
7. Климова А.Ю., Степанов А.Л., Манучарова Н.А. Особенности трансформации соединений азота и углерода в олиготрофной торфяной почве // Почтоведение. 2019. № 10. С. 1198–1202.
8. Кудеяров В.Н. Эмиссия закиси азота из почв в условиях применения удобрений (аналитический обзор) // Почтоведение. 2020. № 10. С. 1192–1205.
9. Кудеяров В.Н. Эмиссионный фактор азота при применении азотных удобрений в земледелии России // Агрохимия. 2021. № 11. С. 3–15.
10. Методические рекомендации по проведению добровольной инвентаризации объемов выбросов парниковых газов в субъектах Российской Федерации. Минприроды России. 2015. 30 с.
11. Простаков П.Е. Наблюдения над динамикой водного и пищевого режима в 10-польном травопольном севообороте на предкавказских карбонатных черноземах при орошении. Отчет Южного института гидротехники и мелиорации. Ч. 1. Новочеркасск, 1950. 72 с.
12. Прянишиников Д.Н. О сравнении действия навоза и минеральных удобрений // Ежемес. науч.-техн. журн. комитета по химизации НХ СССР. 1929. № 1. С. 35–42.
13. Романенков В.А. Агрохимические опыты в системе исследований Геосети: прошлое, настоящее и будущее // Известия ТСХА. 2012. № 3. С. 54–61.
14. Романенков В.А. Динамика запасов почвенного углерода в агроценозах европейской территории России (по данным длительных агрохимических опытов): Автореф. дис. ... докт. биол. н. М., 2011. 47 с.
15. Столбовой В.С., Гребенников А.М., Шилов П.М., Духанин Ю.А. Развитие национальной модели управления бюджетом гумуса (углерода) в почвах агроэкосистем Российской Федерации // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2024. Вып. 120). С. 6–47. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2024-120-6-47>.
16. Сычев В.Г., Налиухин А.Н. Изучение потока углерода и азота в длительных полевых опытах Геосети с целью снижения выбросов парниковых газов и повышения депонирования диоксида углерода агроценозами // Плодородие. 2021. № 6. С. 38–41.
17. Сычёв В.Г., Налиухин А.Н., Ерегин А.В., Шарапова Н.Р., Демидов Д.В. Углерод-секвестрирующая оценка различных систем удобрения и определение эмиссии CO₂ в длительном полевом опыте // Плодородие. 2022. № 6. С. 73–77.
18. Фиатиев Б.Х., Хачетлов Р.М., Шхацева С.Х. О влиянии длительного удобрения на элементы плодородия обыкновенного мицелярно-карбонатного остаточно-луговатого (предкавказского террасового)

- чернозема // Материалы конференции “Научные основы рационального использования почв Северного Кавказа и пути повышения их плодородия”. 1969. Нальчик, 1971. С. 31–325.
19. Charles A., Rochette P., Whalen J.K., Angers D.A., Chantigny M.H., Bertrand N. Global nitrous oxide emission factors from agricultural soils after addition of organic amendments: A meta-analysis // Agriculture, Ecosystems and Environment. 2017. Vol. 236. P. 88–98.
20. Gebrewahid Y., Gebre-Egziabher T.B. Carbon stock potential of scattered trees on farmland along an altitudinal gradient in Tigray, Northern Ethiopia // Ecological Processes. 2018. Vol. 7. No. 1. P. 2–8.
21. Hanson R.S., Hanson T.E. Methanotrophic bacteria // Microbiological reviews. Vol. 60. 1996. No. 2. P. 439–471.
22. IPCC, 2013. Climate Change: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds. Stocker T.F. et al. N.Y.: Cambridge University Press, 2013. 1535 p.
23. Klemetsen L., Klemetsen A.K., Moldan F. Nitrous oxide emission from Swedish forest soils in relation to liming and simulated increased N-deposition // Biol. Fertil. Soils. 1997. Vol. 25. P. 290–295.
24. Körshens M. Soil – Humus – Climate. Practically relevant results of 79 long-term field experiments / Vortrag zum 2. Symp. “Wahrnehmung und Bewertung von Böden in der Gesellschaft am 12. Oktober 2018 in UFZ Leipzig”. 2018. 12 p.
25. Paustian K., Six J., Elliot E.T., Hunt H.W. Management options for reducing CO₂ emission from agricultural soils // Biochemistry. 2000. Vol. 48. P. 147–163.
26. Save and Grow. A policymaker’s guide to the sustainable intensification of smallholder crop production. FAO, Rome. 2011. 116 p.
27. WMO Greenhouse Gas Bulletin. 15–25 November 2019.

REFERENCES

1. Abdo Aj, Sun' D., Jang K., Li U, Shi Z., Abdalla VE, Jel'-Sobki EAOS, Vjej H., Chzhan Dzh., Kuzjakov Ju., Uglerodnyj sled sinteticheskogo azota pod osnovnymi kul'turami: pervyj analiz ot nachala do konca (Carbon footprint of synthetic nitrogen under major crops: a first end-to-end analysis), *Global'naja biologija*, 2024, No. 30(4), e17277, DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.17277>.
2. Bashkin V.N. Jemissija parnikovyh gazov kak mera jenergoeffektivnosti pri ocenke zhiznennogo cikla udobrenij (Greenhouse gas emissions as a measure of energy efficiency in fertilizer life cycle assessment), *Zhizn' Zemli*,

2024, Vol. 46, No. 1, pp. 20–32.

3. Bazdyrev G.I., Loshakov V.G., Puponin A.I., Rassadin A.Ja., Safonov A.F., Tulikov A.M., *Zemledelie* (Agriculture), M.: Izd-vo "Kolos", 2000, 549 p.
4. Gluhovchenko A.F., Agrohimicheskoe obosnovanie produktivnosti kukuruzy na zerno pri raznyh dozah udobrenij i sposobah obrabotki pochvy: Diss. ... kand. s.-kh. nauk (Agrochemical substantiation of grain corn productivity with different fertilizer rates and tillage methods, Cand. Agri. Sci. thesis), Belgorod, 2019, 166 p.
5. Zavalin A.A., Duhanina T.M., Takaeva M.A., Ocenna jemissii zakisi azota v zemledelii Chechenskoj Respubliki (Assessment of nitrous oxide emissions in agriculture of the Chechen Republic), *Plodorodie*, 2023, No.1, pp. 34–39.
6. Kiryushin V.I., *Zadachi i programma nauchno-innovatsionnogo obespecheniya zemledeliya i zemlepol'zovaniya (metodicheskiye rekomendatsii)* (Objectives and program of scientific and innovative support for agriculture and land use (methodological recommendations)), Moscow: OOO "Izdatel'stvo MBA", 2023, 96 p.
7. Klimova A.Ju., Stepanov A.L., Manucharova N.A., Osobennosti transformacii soedinenij azota i ugleroda v oligotrofnoj torfjanoj pochve (Features of the transformation of nitrogen and carbon compounds in oligotrophic peat soil), *Pochvovedenie*, 2019, No. 10, pp. 1198–1202.
8. Kudejarov V.N., Emissija zakisi azota iz pochv v uslovijah primenenija udobrenij (analiticheskij obzor) (Nitrous oxide emission from soils under conditions of fertilizer application (analytical review)), *Pochvovedenie*, 2020, No. 10, pp. 1192–1205.
9. Kudejarov V.N., Emissionnyj faktor azota pri primenenii azotnyh udobrenij v zemledelii Rossii (Nitrogen emission factor during the application of nitrogen fertilizers in agriculture in Russia), *Agrohimija*, 2021, No. 11, pp. 3–15.
10. Methodological recommendations for conducting a voluntary inventory of greenhouse gas emissions in the constituent entities of the Russian Federation. Ministry of Natural Resources of Russia, 2015, 30 p.
11. Prostakov P.E., Nabljudenija nad dinamikoj vodnogo i pishhevogo rezhima v 10-pol'nom travopol'nom sevooborote na predkavkazskih karbonatnyh chernozemah pri oroshenii (Observations on the dynamics of the water and food regime in a 10-field grassland crop rotation on irrigated Ciscaucasian carbonate chernozems), Report of the Southern Institute of Hydroengineering and Land Reclamation, Part 1, Novocherkass, 1950, 72 p.
12. Prjanishnikov D.N., O sravnennii dejstvija navoza i mineral'nyh udobrenij (On the comparison of the effects of manure and mineral fertilizers), *Ezhemes. nauch.-tehn. zhuri. komiteta po himizacii NH SSSR* (Monthly scientific and

- technical journal of the committee on chemicalization of the USSR National Economy), Moscow: 1929, No. 1, pp. 35–42.
13. Romanenkov V.A., Agrohimicheskie optyty v sisteme issledovanij Geoseti: proshloe, nastojashhee i budushhee (Agrochemical experiments in the Geonet research system: past, present, and future), *Izvestija TSHA*, 2012, No. 3, pp. 54–61.
14. Romanenkov V.A., *Dinamika zapasov pochvennogo ugleroda v agrocenozah evropejskoj territorii Rossii (po dannym dlitel'nyh agrohimicheskikh optytov)*: Avtoref. dis. ... dokt. biol. nauk (Dynamics of soil carbon reserves in agrocenoses of the European territory of Russia (based on long-term agrochemical experiments): Extended Abstract of Cand. Biol. Sci. thesis), Moscow, 2011, 47 p.
15. Stolbovoy V.S., Grebennikov A.M., Shilov P.M., Dukhanin Yu.A., Towards a national model of humus (carbon) budget management in soils of agroecosystems in the Russian Federation, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2024, Vol. 120, pp. 6–47, DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2024-120-6-47>.
16. Sychev V.G., Naliuhin A.N., Izuchenie potok ugleroda i azota v dlitel'nyh polevyh optyah Geoseti s cel'ju snizhenija vybrosov parnikovyh gazov i povyshenija deponirovaniya dioksida ugleroda agrocenozami (Study of carbon and nitrogen flux in long-term field experiments of the Geonet to reduce greenhouse gas emissions and increase carbon dioxide sequestration by agrocenoses), *Plodorodie*, 2021, No. 6, pp. 38–41.
17. Sychev V.G., Naliuhin A.N., Eregin A.V., Sharapova N.R., Demidov D.V., Uglerod-sekvestrirujushhaja ocenka razlichnyh sistem udobrenija i opredelenie jemissii CO₂ v dlitel'nom polevom optye (Carbon sequestration assessment of various fertilization systems and determination of CO₂ emissions in a long-term field experiment), *Plodorodie*, 2022, No. 6, pp. 73–77.
18. Fiapshev B.H., Hachetlov R.M., Shhaceva S.H., O vlijanii dlitel'nogo udobrenija na jelementy plodorodija obyknovenного miceljarno-karbonatnogo ostatochno-lugovatogo (predkavkazskogo terrasovogo) chernozema (On the influence of long-term fertilization on the fertility elements of ordinary micellar-carbonate residual-meadow (Ci-Caucasian terrace) chernozem), Materialy konferencii “Nauchnye osnovy racional'nogo ispol'zovaniya pochv Severnogo Kavkaza i puti povyshenija ikh plodorodija” (Proc. of the conf. “Scientific foundations of rational use of soils of the North Caucasus and ways to increase their fertility”), 1969, Nal'chik, 1971, pp. 31–325.
19. Charles A., Rochette P., Whalen J.K., Angers D.A., Chantigny M.H., Bertrand N., Global nitrous oxide emission factors from agricultural soils after addition of organic amendments: A meta-analysis, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2017, Vol. 236, pp. 88–98.

20. Gebrewahid Y., Gebre-Egziabher T.B., Carbon stock potential of scattered trees on farmland along an altitudinal gradient in Tigray, Northern Ethiopia, *Ecological Processes*, 2018, Vol. 7, No. 1, pp. 2–8.
21. Hanson R.S., Hanson T.E., Methanotrophic bacteria, *Microbiological reviews*, Vol. 60, 1996, No. 2, pp. 439–471.
22. Stocker T.F. et al. (Eds.), IPCC, 2013. Climate Change: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, N.Y.: Cambridge University Press, 2013, 1535 p.
23. Klemmedsson L., Klemmedsson A.K., Moldan F., Nitrous oxide emission from Swedish forest soils in relation to liming and simulated increased N-deposition, *Biol. Fertil. Soils*, 1997, Vol. 25, pp. 290–295.
24. Körshens M., Soil – Humus – Climate. Practically relevant results of long-term field experiments, Vortrag zum 2. Symp. “Wahrnehmung und Bewertung von Böden in der Gesellschaft am 12. Oktober 2018 im UFZ Leipzig”, 2018, 12 p.
25. Paustian K., Six J., Elliot E.T., Hunt H.W., Management options for reducing CO₂ emission from agricultural soils, *Biochemistry*, 2000, Vol. 48, pp. 147–163.
26. Save and Grow, A policymaker’s guide to the sustainable intensification of smallholder crop production. FAO, Rome, 2011, 116 p.
27. WMO Greenhouse Gas Bulletin, 15–25 November 2019.

УДК 631.47:631.67



DOI: 10.19047/0136-1694-2025-125-181-213



Ссылки для цитирования:

Хитров Н.Б. Дифференцированный отбор образцов почв по глубине в пределах поверхностного слоя 0–30 см для мониторинга содержания и запасов органического углерода // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2025. Вып. 125. С. 181–213. DOI: 10.19047/0136-1694-2025-125-181-213

Cite this article as:

Khitrov N.B., Differential soil sampling by depth within surface layer 0–30 cm for monitorig of content and storage of soil organic carbon, Dokuchaev Soil Bulletin, 2025, V. 125, pp. 181-213, DOI: 10.19047/0136-1694-2025-125-181-213

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 as part of the implementation of a major state innovative project of national importance: “Development of a ground and remote monitoring system for carbon pools and greenhouse gas fluxes across the territory of the Russian Federation, ensuring the creation of a data accounting system for the flows of climate-active substances and the carbon budget in forests and other terrestrial ecological systems” (reg. No. 123030300031-6).

Дифференцированный отбор образцов почв по глубине в пределах поверхностного слоя 0–30 см для мониторинга содержания и запасов органического углерода

© 2025 г. Н. Б. Хитров

ФИЦ “Почвенный институт им. В.В. Докучаева”, Россия,
119017, Москва, Пыжевский пер, 7, стр. 2,
<https://orcid.org/0000-0001-5151-5109>, e-mail: khitrovn@gmail.com.

Поступила в редакцию 20.03.2024, после доработки 10.04.2024,
принята к публикации 16.09.2025

Резюме: Для ведения мониторинга содержания и запасов органического углерода ($C_{опр}$) в почвах агроэкосистем предложен дифференцированный отбор образцов почв по глубине тонкими слоями. Его целью является получение приемлемых значений минимальной значимой разности содержания и запасов $C_{опр}$ при сравнении двух сроков наблюдений и статистически обоснованного представления о вертикальном распределении $C_{опр}$ в поверхностных слоях почвы в отдельный срок наблюдений. Вертикальное распределение $C_{опр}$ в слое 0–30 см может служить косвенным критерием способности секвестрации $C_{опр}$ почвой в начальный базовый период мониторинга до получения прямых измерений содержания $C_{опр}$ в следующие сроки опробования на той же динамической площадке. Представлены графики распределения по почвенному профилю содержания $C_{опр}$, плотности почв, запасов $C_{опр}$ в природных почвах. Обсуждаются три принципиальных варианта профильного распределения содержания $C_{опр}$, разные варианты распределения плотности в почвах агроэкосистем. Отмечены тенденции увеличения вариабельности содержания $C_{опр}$ в дерново-подзолистых, светло-каштановых почвах и черноземах при увеличении глубины отбора образца в пределах слоя 0–40 см. Обсуждается пространственная вариабельность запасов $C_{опр}$ в отдельных тонких слоях и в обобщенных слоях разной мощности.

Ключевые слова: пашня; сенокос; пастище; залежь; мониторинг земель; пахотный горизонт; плотность почвы; гумусовый горизонт; гумусовый слой.

Differential soil sampling by depth within surface layer 0–30 cm for monitoring of content and storage of soil organic carbon

© 2025 N. B. Khitrov

Federal Research Centre “V.V. Dokuchaev Soil Science Institute”,
7 Bld. 2 Pyzhevskiy per., Moscow 119017, Russian Federation,
<https://orcid.org/0000-0001-5151-5109>, e-mail: khitrovn@gmail.com.

Received 20.03.2024, Revised 10.04.2024, Accepted 16.09.2025

Abstract: Differential soil sampling by depth in thin layers is suggested for monitoring of organic carbon (C_{org}) content and storage in soils of agroecosystems. Its goal is to obtain acceptable values of minimal detectable difference of C_{org} content and storage comparing two observation periods and statistically based idea of C_{org} vertical distribution in surface soil layers in one observation period. Vertical distribution of C_{org} within layer 0–30 cm can serve as an indirect criterion of C_{org} sequestration ability in soil in the initial base period of monitoring before direct measuring of C_{org} in the next observation periods at the same dynamic plot. Graphs of distribution of C_{org} content, soil density and C_{org} storage along the soil profile in natural soils are submitted. Three principal variants of C_{org} content distribution along soil profile and different variants of bulk density vertical distribution in soils of agroecosystems are discussed. Tendencies of increasing variability in C_{org} content due to increasing depth of soil sampling within layer 0–40 cm in soddy-podzolic (Albic Retisols), light-chestnut (Haplic Kastanozem) soils and chernozems were noted. Spatial variability of C_{org} storage in thin layers and in generalized layers of different thickness is discussed.

Keywords: arable land; haymaking; pasture; agricultural fallow; land monitoring; plow horizon; humus horizon; humus layer.

ВВЕДЕНИЕ

Регистрируемое глобальное изменение климата Земли (Результаты исследований изменения климата..., 2005; Жеребцов и др., 2011; Национальный доклад..., 2018) в последнее столетие, когда выполняются регулярные метеорологические наблюдения, многие исследователи связывают с увеличением концентрации парниковых газов (CO_2 , CH_4 , окислов азота) в атмосфере (МГЭИК, 2006; IPCC, 2019) и в целом с изменением глобального цикла углерода, затрагивающего все компоненты геосистемы: атмосферу, гидросферу, литосферу и педосферу.

Согласно протоколу для измерения, мониторинга, доклада и верификации содержания почвенного органического углерода (C_{opr}) в агроландшафтах (FAO, 2020), считается необходимым оценивать изменение содержания C_{opr} в почве на основе прямого отбора образцов почвы и химического определения C_{opr} в них в разные сроки по времени. Для почв характерна изменчивость C_{opr} в пространстве и во времени (Хитров и др., 2023). Существующие

оценки многолетнего тренда изменения C_{opr} в почвах обычно находятся в пределах до 0.07%(абс.)/год по содержанию C_{opr} и до 0.5 т/(га год) по запасам C_{opr} (Сорокина, Когут, 1997; Guillaumé et al., 2021; Deng et al., 2018; Dondini et al., 2023; Романенков и др., 2024). Величина годового прироста содержания C_{opr} в почве сопоставима или меньше аналитической воспроизводимости используемых методов, заметно меньше амплитуды сезонной динамики и еще меньше по сравнению с пространственной вариабельностью рассматриваемых показателей (рис. 1) (Хитров и др., 2023). Сравнение потенциального изменения содержания и запасов C_{opr} во времени с возможностью их обоснования прямыми наземными измерениями приводит к заключению о целесообразности повторных измерений C_{opr} на тех же динамических площадках с периодичностью минимум 5 лет, в идеале 10–20 лет (рис. 2) (Хитров и др., 2023).

В связи с этим при подготовке методического руководства по наземному мониторингу содержания и запасов C_{opr} в почвах агроэкосистем стали очевидными две задачи: (1) получить надежные, статистически обоснованные данные по указанным показателям в начальный базовый период наблюдений; (2) предложить вариант оценки возможности выполнять углерод-секвестрирующую функцию в почвах с помощью той или иной технологии использования сельскохозяйственных угодий в базовый период мониторинга, не ожидая повторного измерения во времени через 5–10 лет или более. Для решения второй части этой задачи предложена идея дифференцированного отбора образцов по глубине тонкими слоями в почвах на сельскохозяйственных угодьях.

Целью дифференцированного отбора образцов почв по глубине тонкими слоями является *получение приемлемых* (не выше некоторого порога, когда ведение мониторинга становится бессмысленным из-за высокой вероятности получения незначимых изменений показателя) значений *минимальной значимой разности* содержания и запасов C_{opr} при сравнении двух сроков наблюдений и *статистически обоснованного представления о вертикальном распределении* C_{opr} в поверхностных слоях почвы в отдельный срок измерений.

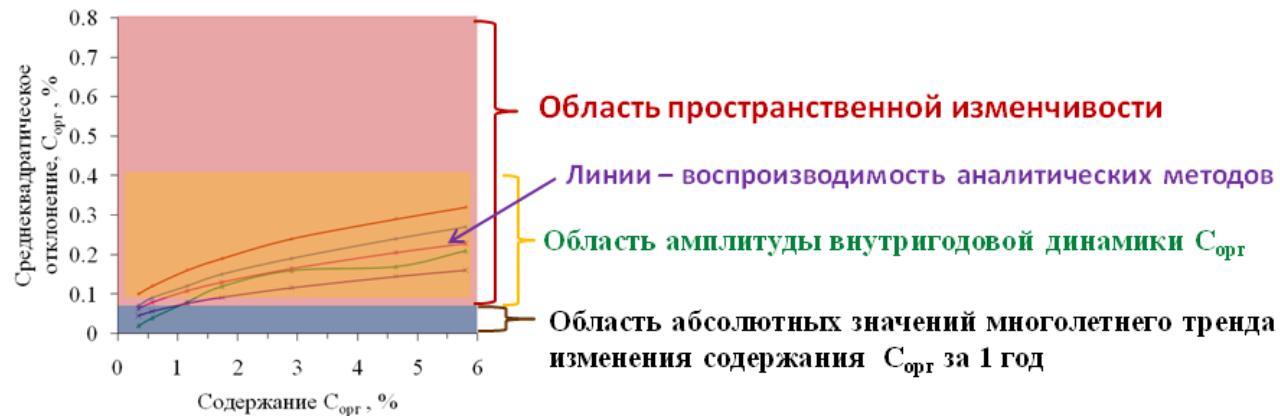


Рис. 1. Соотношение между значениями многолетнего тренда изменения содержания C_{org} за 1 год в почвах, амплитудой сезонной динамики C_{org} , воспроизводимостью аналитических методов определения C_{org} и пространственной изменчивостью на небольших по размеру площадках.

Fig. 1. Relationship between values of longtime trend of C_{org} content change during 1 year in soils (grey box and inscription), season dynamics of C_{org} (yellow box, green inscription), reproducibility of analytical methods for C_{org} determination (lines at graph, violet inscription) and spatial variability within small plots (red box and inscription). Axis: horizontal – C_{org} content, %, vertical – standard deviation of C_{org} , %.

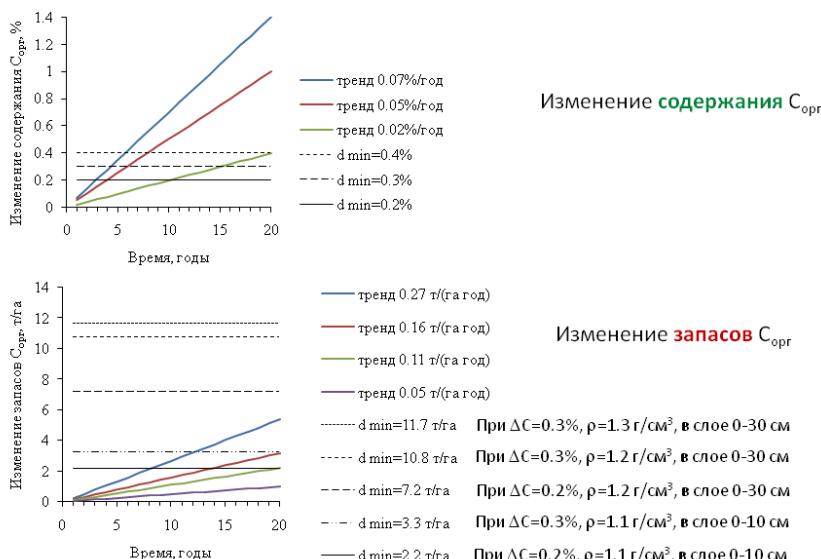


Рис. 2. Сравнение потенциального изменения содержания и запасов C_{opr} во времени с возможностью их обоснования прямыми наземными измерениями. Цветные прямые – изменение содержания или запасов C_{opr} во времени в соответствии с величиной многолетнего тренда (значения из оценок по литературным данным). d_{min} – минимальная значимая разность средних содержания или запасов C_{opr} в два срока измерения. ΔC – изменение содержания C_{opr} , ρ – средняя плотность слоя почвы.

Fig. 2. Comparison of potential change of C_{org} content (upper diagram) and storage (downer diagram) in time and possibility of its detection by direct field measuring. Color lines – C_{org} content or storage change in time in accordance on a value of longtime trend (values of evaluations by data from literature). d_{min} – minimal detectable difference between mean values of C_{org} content or storage in two time periods of determination. ΔC – change of C_{org} content, ρ – soil bulk density.

Предполагается, что вертикальное распределение C_{opr} в один срок наблюдений может служить косвенным критерием способности секвестрации C_{opr} почвой в начальный (базовый) период мониторинга до получения прямых измерений содержания C_{opr} в разные сроки опробования на той же динамической площадке.

Цель статьи – представить обоснование дифференцирован-

ного отбора образцов по глубине в пределах поверхностного слоя 0–30 см при мониторинге содержания и запасов органического углерода в почвах агрозоисистем и дать возможную интерпретацию результатов его применения.

ОБОСНОВАНИЕ ДИФФЕРЕНЦИРОВАННОГО ОТБОРА ОБРАЗЦОВ ПОЧВ ТОНКИМИ СЛОЯМИ

Вертикальное распределение содержания C_{opr} по профилю природных почв. Природные механизмы возможного изменения C_{opr} в почвах связаны с балансом процессов поступления органического вещества в почву, с одной стороны, и процессов разложения и трансформации органических веществ в почве, с другой. Основные пути поступления органических веществ в природные почвы: (1) на поверхность почвы в виде отмерших частей растений (растительный опад), (2) внутрь почвы с корневым отпадом. Процессы разложения и трансформации органических веществ в почве осуществляют микроорганизмы, мезо- и макрофауна, активность которых наибольшая в поверхностных горизонтах почвы, где сосредоточено наибольшее количество свежего органического вещества, поступившего в почву. Следует также упомянуть возможность удаления, переноса и накопления органоминерального материала почв вдоль дневной поверхности в результате эрозионных процессов.

В связи с этим в условиях отсутствия или слабого проявления эрозионного удаления вещества в природных почвах формируется вертикальный профиль распределения C_{opr} аккумулятивного типа с максимумом возле дневной поверхности и уменьшением C_{opr} с глубиной (рис. 3 А–F), который напоминает вертикальное распределение биомассы корней (рис. 3G) (Афанасьева, 1966; Вишневская, 1964).

Вертикальное распределение C_{opr} по профилю почв агрозоисистем. При осуществлении хозяйственной деятельности человека процессы поступления органических веществ в почву сохраняются, отличаясь частичным отъемом надземной биомассы растений за счет вывоза урожая на пашне, сенокошения или поедания пасущимися животными.

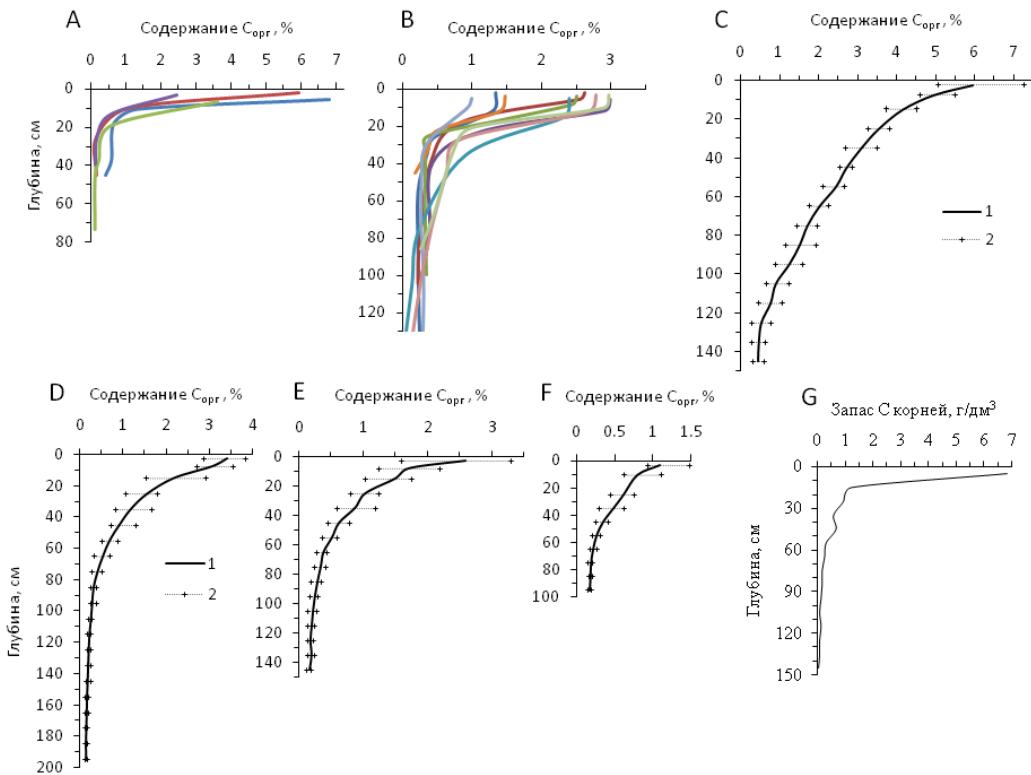


Рис. 3. Вертикальный профиль распределения среднего содержания органического углерода (1) и пределы варьирования (2) в некоторых природных почвах: **A** – дерново-подзолистые почвы центральных и восточных районов Восточно-Европейской равнины, лес, 4 индивидуальных разреза (Подзолистые почвы ..., 1980, с. 226–227); **B** – серые лесные почвы из разных регионов Восточно-Европейской равнины, лес, 9 индивидуальных разрезов (Вологжанина, 1984); **C** – черноземы типичные тяжелосуглинистые, целина, Стрелецкая Степь (Курская обл.), среднее из 7 разрезов (Афанасьева, 1966, с. 52); **D** – лугово-черноземные среднесуглинистые почвы больших падин, целина, Джаныбекский стационар (Волгоградская обл.), среднее из 6 разрезов (Роде, Польский, 1961, с. 154); **E** – светло-каштановые среднесуглинистые почвы, целина, Джаныбекский стационар (Волгоградская обл.), среднее из 3 разрезов (Роде, Польский, 1961, с. 112); **F** – солонцы каштановые солончаковые среднесуглинистые, целина, Джаныбекский стационар (Волгоградская обл.), среднее из 7 разрезов (Роде, Польский, 1961, с. 52); **G** – пример вертикального профиля содержания углерода в живых корнях растений – чернозем типичный среднемощный тяжелосуглинистый на лёссовидных суглинках, целина, Стрелецкая Степь (Афанасьева, 1966, с. 47).

Fig. 3. Vertical profile distribution of mean value of C_{org} content (1) and variation limits (2) in several natural soils: **A** – soddy-podzolic soils (Albic Retisols) from central and eastern regions of East European Plain, forest, 4 individual pits (Podzolic soils ..., 1980, p. 226–227); **B** – grey forest soils (Luvic Greyzem Phaeozems) from different regions of East European Plain, forest, 9 individual pits (Vologzhanina, 1984); **C** – loamic typical chernozems (Haplic Chernozems (Loamic, Pachic)), virgin steppe, Streletskaya Steppe (Kursk Region), mean from 7 pits (Afanas'eva, 1966, p. 52); **D** – loamic meadow-chernozemic soils (Luvic Kastanozems) of large shallow hollow, virgin steppe, Dzhanybek experimental station (Volgograd Region), mean from 6 pits (Rode, Polsky, 1961, p. 154); **E** – loamic light-chestnut soils (Haplic Kastanozems (Loamic), virgin steppe, Dzhanybek experimental station (Volgograd Region), mean from 3 pits (Rode, Polsky, 1961, p. 112); **F** – loamic solonchakous chestnut solonetzi (Salic Solonetz (Loamic, Cutanic, Differentic)), virgin steppe, Dzhanybek experimental station (Volgograd Region), mean from 7 pits (Rode, Polsky, 1961, p. 52); **G** – an example of vertical profile of carbon content in alive plant roots – loamic typical chernozems (Haplic Chernozems (Loamic, Pachic)), virgin steppe, Streletskaya Steppe (Afanas'eva, 1966, p. 47).

На пашне дополнительно бывает целенаправленное формирование мульч-слоя из пожнивных остатков, а также внесение органических и органо-минеральных материалов (удобрений, мелиорантов и проч.) в почву с заделкой их на разную глубину. Процессы разложения и трансформации органических веществ в почве агроэкосистем усиливаются при дополнительной аэрации поверхностного горизонта во время вспашки. Как правило, более интенсивными становятся процессы сноса и аккумуляции вещества в результате эрозии.

В почвах агроэкосистем возможны, по крайней мере, три варианта вертикального распределения C_{opr} в пределах слоя 0–30 см после уборки урожая до очередного перемешивания, если оно выполняется ежегодно: (1) равномерное распределение C_{opr} в пределах пахотного горизонта и заметное уменьшение его глубже – стационарный режим в многолетних циклах при нулевом балансе (рис. 4А); (2) более низкое содержание C_{opr} в верхнем слое до 5–10 см по сравнению с нижней частью пахотного горизонта – деградационный режим в многолетних циклах в связи с отрицательным балансом органического вещества в поверхностном слое (рис. 4В); (3) более высокое содержание C_{opr} в верхнем слое до 5–10 см по сравнению с нижним в пределах пахотного горизонта или слоя 0–30 см – потенциальный режим накопления до возможного предела в виде стационарного вертикального профиля C_{opr} с максимумом возле поверхности за счет положительного баланса органического вещества в поверхностном слое (рис. 4С).

Первый вариант – равномерное распределение в пределах пахотного горизонта (рис. 4А) – встречается в условиях грамотного ведения зональных систем земледелия на пашне, использовавшихся повсеместно в России в 1970-х – 2000-х гг. Технологии обработки почвы, включающие вспашку с оборотом пласта, были направлены на формирование однородного пахотного горизонта по содержанию органического вещества и питательных элементов для растений.

Второй (деградационный) вариант вертикального распределения C_{opr} в пределах пахотного горизонта (рис. 4В) обычно возникает при нарушениях технологий обработки почв и ведения хозяйства, приводящих к интенсивному разложению органических

веществ в поверхностном слое почвы без компенсации его поступлением с пожнивными остатками и удобрениями. Ежегодный оборот пласта при вспашке при таком профиле приводит к перемещению материала с более низким содержанием $C_{\text{опр}}$ из поверхностного слоя вниз и перемешиванию его с остальной массой пахотного горизонта. Повторение такого перемешивания постепенно приводит к общему снижению содержания $C_{\text{опр}}$ в пахотном горизонте.

В последние два десятилетия во многих хозяйствах перешли преимущественно на минимальные системы обработки почвы до глубины 10–15 см. Вспашка с оборотом пласта не исключается полностью, но используется в годы возделывания пропашных культур. На таких полях в почвах более дифференцированным становится верхний слой 0–10(15) см с возможным его подразделением на слои 0–5, 5–10 см, которые целесообразно анализировать раздельно при мониторинге запасов углерода. Данных о вертикальном распределении $C_{\text{опр}}$ при использовании таких технологий пока нет.

В ряде хозяйств перешли полностью на технологию прямого посева (No-Till) или ее используют, чередуя со вспашкой под пропашные культуры. Редкое нарушение почвы механическими обработками только во время сева стерневыми сейлками сопровождается постепенным изменением профиля бывшего пахотного горизонта по содержанию углерода и плотности. Наибольшие изменения предполагаются в поверхностных слоях 0–5 и 5–10 см за счет поступления на поверхность большого количества растительных остатков в виде мульчи в условиях прекращения перемешивания бывшего пахотного слоя плугом с оборотом пласта. Их целесообразно анализировать раздельно, поскольку именно в поверхностных слоях возможно накопление $C_{\text{опр}}$, которое проявляется в виде формирования третьего варианта вертикального распределения (рис. 4С).

Под посевами многолетних трав через 5–10 лет может формироваться дернина мощностью до 10–15 см и аккумулятивный вертикальных профиль $C_{\text{опр}}$ (рис. 5А).

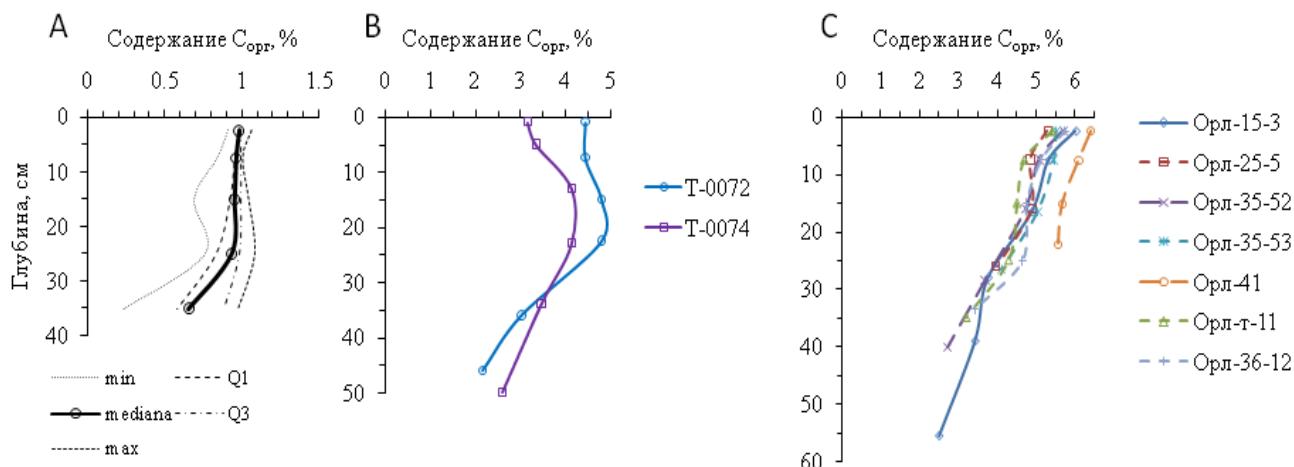


Рис. 4. Варианты вертикального распределения C_{org} в пределах слоя 0–30 см в почвах агроэкосистем: **A** – равномерное; **B** – более низкое содержание C_{org} в верхних 0–5 см по сравнению с нижней частью пахотного горизонта; **C** – аккумулятивное с максимумом возле поверхности. Почвы: **A** – агрозем аккумулятивно-карбонатный среднесуглинистый на лёссовидных суглинках, объем выборки – 9 точек, богарная пашня, Волгоградская область; **B** – агрочерноземы глинисто-иллювиальные квазиглеевые слабозасоленные глинистые на лёссовидных глинах, индивидуальные разрезы, пашня с вторичным переувлажнением, Воронежская область, Каменная Степь; **C** – агрочерноземы глинисто-иллювиальные глинистые на красно-бурых пермских глинах, индивидуальные разрезы, богарная пашня с использованием технологии No-Till более 10 лет, Похвистневский район, Самарская область.

Fig. 4. Variants of vertical distribution of C_{org} content within the layer 0–30 cm in soils in agroecosystems: **A** – uniform one; **B** – lower C_{org} content in the upper 0–5 cm in comparison on downer part of plow horizon; **C** – accumulative distribution with maximum near surface. Soils: **A** – loamic accumulative-carbonate agrozem (Haplic Kastanozem (Aric, Loamic)) developed from loess-like loams, sample size – 9 pits, dry arable land, Volgograd Region; **B** – clayic slightly salinized quasygleyic clay-illuvial agrochernozems (Luvic Gleyic Chernozems (Aric, Loamic, Pachic, Protosalic)) developed from loess-like clays, individual pits, arable land after secondary overmoistening, Voronezh Region, Kamennaya Steppe; **C** – clayic clay-illuvial agrochernozems (Luvic Chernozems (Aric, Clayic, Pachic)) developed from red-brown Permian clays, individual pits, arable land with No-Till during more than 10 years, Pokhvistnevsky District, Samara Region.

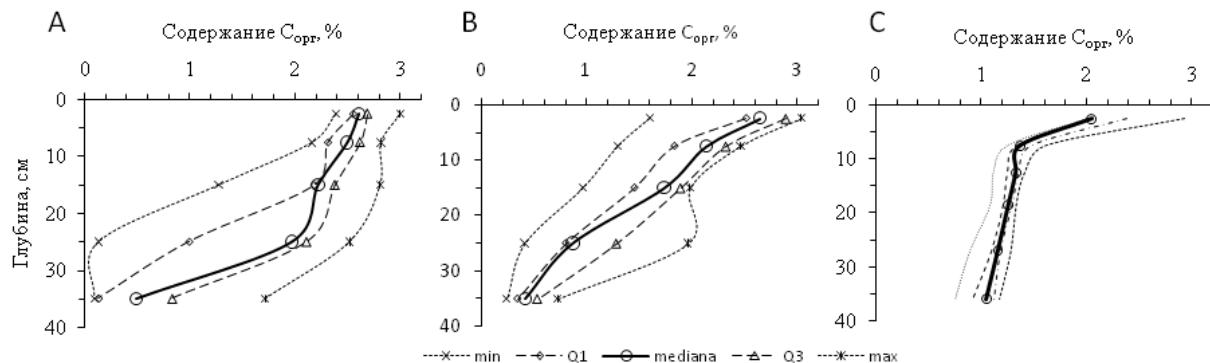


Рис. 5. Аккумулятивный вертикальный профиль С_{орг} с максимумом возле поверхности (объем выборки – 9 точек) в почвах агроэкосистем: А – многолетние травы 6-го года, пятнистость агродерново-подзолистых супесчано-суглинистых почв на двучленах и агродерново-подзолов иллювиально-железистых на песках, подстилаемых мореной, Тверская область; В – сенокос, дерново-подзолы иллювиально-железистые супесчаные на флювиогляциальных песках, Тверская обл.; С – залежь более 45 лет, светло-каштановая солонцеватая среднесуглинистая почва на лёссовидных суглинках, Волгоградская область.

Fig. 5. Accumulative vertical profile of C_{org} content with maximum near surface (sample size – 9 pits) in soils in agroecosystems: A – 6-year grasses, spottiness of agrosoddy-podzolic arenic-loamic soils (Albic Retisols (Abruptic, Aric, Epiarenic, Katoloamic, Cutanic)) developed from two-layer sediments and agrosoddy-podzols iron-illuvial arenic (Albic Podzols (Aric, Arenic)) developed from sands underlined by moraine, Tver Region; B – haymaking, soddy-podzols iron-illuvial arenic (Albic Podzols (Arenic)) developed from fluvioglacial sands, Tver Region; C – agricultural fallow over 45 years, loamic solonetzic light-chestnut soil (Haplic Kastanozem (Loamic, Protosodic, Bathysalic)) developed from loess-like loams, Volgograd Region.

На сенокосах характерно формирование в почве дернины, в пределах которой в зависимости от обилия корней происходит заметное изменение по профилю почвы и содержания углерода, и плотности почвы. По этой причине при небольшой мощности дернины (5–10 см) необходимо раздельно анализировать два слоя: 0–5, 5–10 см, а при мощности более 10 см – три слоя: 0–5, 5–10, 10–15 см.

На пастбищах в зависимости от нагрузки, определяемой количеством и видом выпасаемых животных, основные изменения содержания углерода и плотности происходят также в поверхностных горизонтах под воздействием поступления на поверхность экскрементов животных, вытаптывания, уплотнения и разрушения агрегатов почвы копытами животных и др. В связи с этим раздельный анализ верхних слоев 0–5 и 5–10 см обязателен.

В ненарушенных вспашкой почвах под сенокосами и пастбищами обычно формируется аккумулятивный вертикальный профиль C_{opr} с максимумом возле поверхности (рис. 5В), приблизительно соответствующий вертикальному распределению биомассы корней.

В почвах залежей по мере смены растительных сукцессий основные изменения содержания углерода и плотности приурочены тоже к поверхностному слою. Они связаны с появлением и развитием дернины. Вертикальный профиль C_{opr} становится аккумулятивным с максимумом возле поверхности (рис. 5С), как в природных почвах с постоянным травянистым покровом.

В почвах лесополос к факторам, характерным для залежей, добавляются поверхностное поступление опада листвьев и особое распределение тонких корней древесной растительности, способствующих разрыхлению верхних горизонтов почв.

Таким образом, природные процессы и технологии возделывания сельскохозяйственных культур в совокупности приводят к накоплению или деградации содержания C_{opr} , прежде всего, в поверхностных слоях почвы в пределах глубины 5–10 см. Этим слоям целесообразно уделить особое внимание при мониторинге.

Вертикальное распределение плотности по профилю природных почв. Почвы имеют неравномерный вертикальный профиль распределения плотности. Поверхностные горизонты почв

обычно менее плотные по сравнению со средней и нижней частями профиля и почвообразующей породой (рис. 6). Это связано с разрыхляющей деятельностью корневых систем растений, роющей деятельностью мезо- и макрофауны, проявления процессов набухания и усадки в циклах увлажнения и высыхания почвы, увеличивающейся с глубиной механической нагрузкой вышележащих слоев почвы на нижележащие, процессами аккумуляции разных веществ в отдельных горизонтах почвы. В средней части профиля солончаковых солонцов (рис. 6С) разрыхляющим агентом являются кристаллы сульфата натрия (Роде, Польский, 1961). Более высокие значения плотности характерны для текстурного горизонта в дерново-подзолистых почвах (рис. 6А), солонцового горизонта в солонцах (рис. 6С), аккумулятивно-карбонатного горизонта с белоглазкой в светло-каштановых почвах (рис. 6Д).

Вертикальное распределение плотности по профилю почв агроэкосистем. Деятельность человека сильно изменяет плотность верхней части почвенного профиля в результате применения разнообразных механических обработок в соответствии с используемыми технологиями возделывания сельскохозяйственных культур и механического давления движителей, выполняющих эти обработки, уборку урожая и вывоз продукции с поля. В итоге вертикальный профиль плотности почвы в поверхностных горизонтах до глубины 30–50 см приобретает специфические особенности в зависимости от свойств исходной почвы, применяемой технологии и предшествующей истории использования почвы.

Технологии обработки почвы, включающие вспашку с оборотом пласта, культивацию и боронование, способствуют формированию трех подгоризонтов по плотности в пределах пахотного слоя: (1) 0–10(12) см, (2) 10(12)–22(25) см, (3) 22(25)–30(35) см (рис. 7). Первый из подгоризонтов по плотности соответствует глубине поверхностных механических обработок (боронование, культивация); второй – нижней половине ежегодно оборачиваемого пласта при основной вспашке; третий – глубокой вспашке под пропашные культуры раз в 5–7 лет в зависимости от типа севооборота. Эти подгоризонты заметно отличаются по плотности: наименее плотный – поверхностный, наиболее плотный второй, реже третий. Варианты, когда третий слой на глубине 25–35 см

оказывается наиболее плотным, часто неправильно называют “плужной подошвой”, хотя его происхождение связано с механическим давлением тяжелой техники при ее движении по почве во влажном состоянии и более редким рыхлением в течение ротации севаоборота.

Другие технологии выращивания сельскохозяйственных культур на пашне (плоскорезная обработка, минимальная обработка, технология прямого посева или No-Till и др.) создают свой вертикальный профиль плотности в пределах слоя 0–30 см, частично наследуя результаты предыдущего периода использования почвы в пашне с оборотом пласта, отличающийся для разных почв и условий хозяйственной деятельности.

Вертикальный профиль распределения запасов органического углерода в почве является сложным результатом распределения содержания C_{opr} и плотности по глубине. При равномерном распределении содержания C_{opr} в пределах обрабатываемого слоя до 30 см изменение плотности почвы определяет вертикальный профиль распределения запасов органического углерода, отличающийся от равномерного. Аккумулятивный профиль содержания C_{opr} с максимумом возле поверхности почвы, сочетаясь с профилем плотности, имеющим минимум возле поверхности и увеличение плотности с глубиной, создает разные варианты вертикального профиля запасов C_{opr} . В связи с этим целесообразно мониторинг вести по трем переменным: (1) содержанию C_{opr} в отдельных тонких слоях мощностью не более 10 см, оценивая вертикальный профиль содержания C_{opr} ; (2) запасам C_{opr} в разных отдельных тонких слоях; (3) запасам C_{opr} в обобщенных слоях увеличивающейся мощности до глубины 30 см и до нижней границы гумусового слоя.

Пространственное варьирование запасов C_{opr} . Увеличение толщины слоя почвы, в котором определяют запас C_{opr} , сопровождается заметным увеличением абсолютного среднеквадратического отклонения величины запаса C_{opr} и соответствующей ему минимальной значимой разности оценок в два срока измерений (рис. 8).

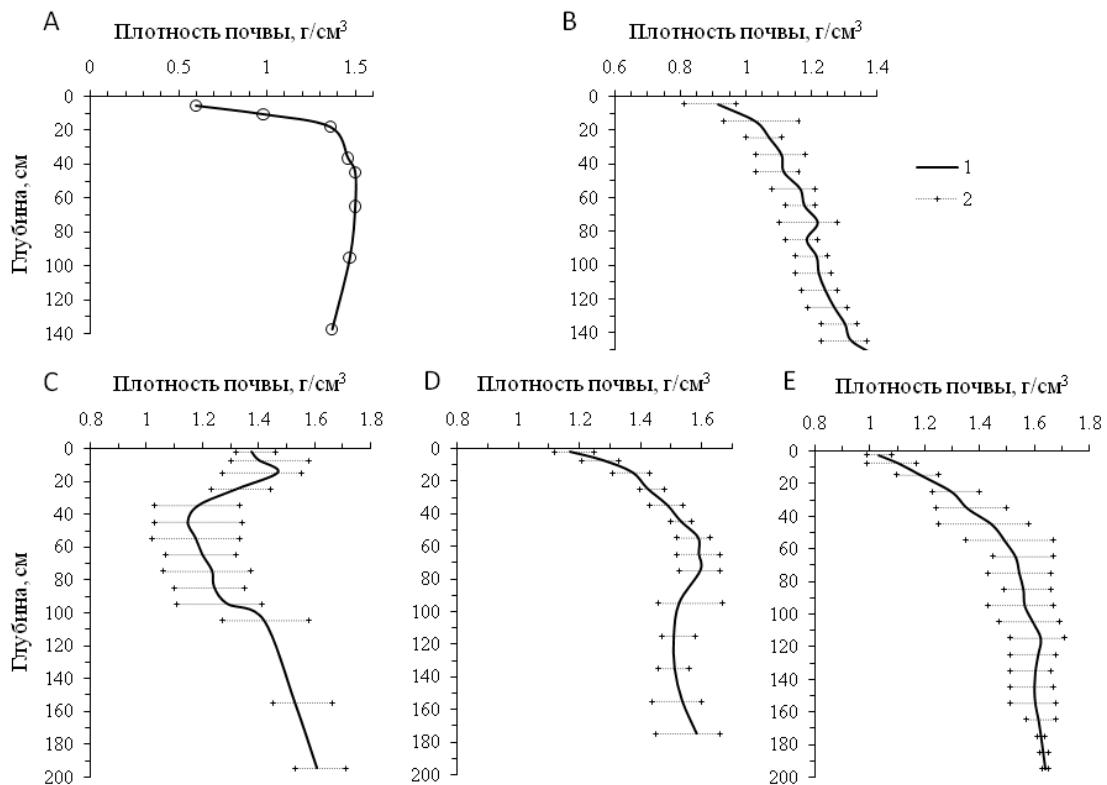


Рис. 6. Вертикальный профиль плотности природных почв (1 – среднее, 2 – пределы): **A** – дерново-подзолистая суглинистая почва на покровном суглинке, смешанный лес, разрез 2-Н, Кировская обл. (Подзолистые почвы ..., 1980, с. 231); **B** – чернозем типичный тяжелосуглинистый на лёссовидных суглинках, Стрелецкая Степь, Курская обл., целина, среднее из 3 разрезов (Афанасьева, 1966, с. 47–49); **C** – солонцы каштановые солончаковые среднесуглинистые на хвальинских суглинках, целина, Джаныбекский стационар (Волгоградская обл.), среднее из 8 разрезов (Роде, Польский, 1961, с. 57–58); **D** – светло-каштановые среднесуглинистые почвы, целина, Джаныбекский стационар (Волгоградская обл.), среднее из 4 разрезов (Роде, Польский, 1961, с. 113–115); **E** – лугово-черноземные среднесуглинистые почвы больших падин, целина, Джаныбекский стационар (Волгоградская обл.), среднее из 6 разрезов (Роде, Польский, 1961, с. 156).

Fig. 6. Vertical profile of bulk density of natural soils (1 – mean, 2 – limits): **A** – loamic soddy-podzolic soil (Albic Retisol) developed from cover loams, mixed forest, pit 2-H, Kirov Region (Podzolic soils ..., 1980, p. 231); **B** – loamic typic chernozem (Haplic Chernozem (Loamic, Pachic)) developed from loess-like loams, Streletskaya Steppe, Kursk Region, virgin steppe, mean from 3 pits (Afanas'eva, 1966, p. 47–49); **C** – loamic solonchakous chestnut solonetz (Salic Solonetz (Loamic, Cutanic, Differentic)), virgin steppe, Dzhanybek experimental station (Volgograd Region), mean from 4 pits (Rode, Polsky, 1961, p. 57–58); **D** – loamic light-chestnut soils (Haplic Kastanozems (Loamic)), virgin steppe, Dzhanybek experimental station (Volgograd Region), mean from 4 pits (Rode, Polsky, 1961, p. 113–115); **E** – loamic meadow-chernozemic soils (Luvic Kastanozem) of large shallow hollow, virgin steppe, Dzhanybek experimental station (Volgograd Region), mean from 6 pits (Rode, Polsky, 1961, p. 156).

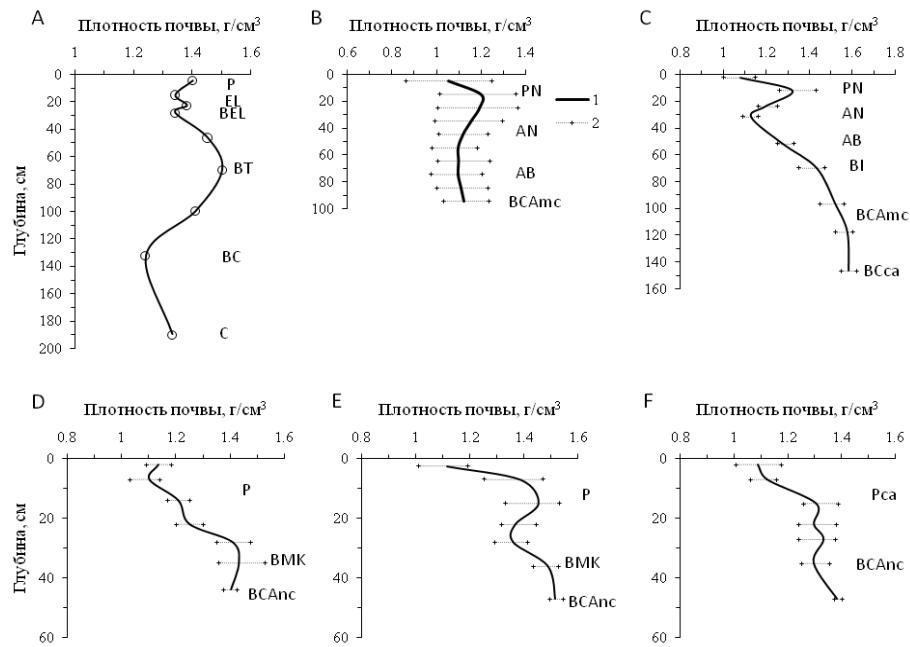


Рис. 7. Вертикальный профиль плотности почв сельскохозяйственных угодий (1 – среднее, 2 – пределы): **A** – агродерново-подзолистая суглинистая почва на покровном суглинке, пашня, мощность пахотного слоя 21 см, разрез 1-Н, Кировская обл. (Подзолистые почвы ..., 1980, с. 231); **B** – сочетание агрочерноземов мицелярных и глинисто-иллювиальных тяжелосуглинистых на лёссовидных суглинках, пашня, мощность пахотного слоя 30 см,

10 разрезов, Курская обл.; **C** – агрочернозем глинисто-иллювиальный среднемощный тяжелосуглинистый на лёссовидных суглинках, пашня, мощность пахотного слоя 30 см, Каменная Степь, Воронежская обл.; **D, E** – агрокаштановые солонцеватые срединно-вскипающие среднесуглинистые почвы на лёссовидных суглинках, пашня, богара, мощность пахотного слоя 30 см, объем выборки 5, опытная станция “Орошаемая”, Волгоградская обл.; **F** – агрозем аккумулятивно-карбонатный солонцеватый поверхностно-вскипающий среднесуглинистый на лёссовидных суглинках, пашня, богара, мощность пахотного слоя 30 см, объем выборки 5, опытная станция “Орошаемая”, Волгоградская обл. Диагностические горизонты: Р – агрогумусовый; PN – агрочерногумусовый; AN – черногумусовый; AB – переходный гумусовый; EL – элювиальный; BEL – элювиально-иллювиальный; BT – текстурный; BI – глинисто-иллювиальный; BMK – ксерометаморфический; BCAmc и BCAnc – аккумулятивно-карбонатный с карбонатным мицелием (mc) и белоглазкой (nc); BC – переходный к породе; C – почвообразующая порода; малый индекс са – наличие дисперсных карбонатов - сплошное вскипание от HCl.

Fig. 7. Vertical profile of bulk density of soils in agricultural lands (1 – mean, 2 – limits): **A** – loamic soddy-podzolic soil (Albic Retisol) developed from cover loams, arable land, pit 1-H, Kirov Region (Podzolic soils ..., 1980, p. 231); **B** – soil cover combination of loamic micellller and clay-illuvial agrochernozems (Haplic and Luvic Chernozems (Aric, Loamic, Pachic)) developed from loess-like loams, arable lands, thickness of plow horizon is 30 cm, 10 pits, Kursk Region; **C** – loamic clay-illuvial agrochernozem (Luvic Chernozems (Aric, Loamic, Pachic)) developed from loess-like loams, arable land, thickness of plow horizon is 30 cm, Kamennaya Steppe, Voronezh Region; **D, E** – loamic solonetzic agrochestnut soils (Haplic Kastanozems (Aric, Loamic)) with depth of effervescence in the middle of soil profile, dry arable land, thickness of plow horizon is 30 cm, sample size is 5, Experimental station “Oroshaemaya”, Volgograd Region; **F** – loamic solonetzic agrozems (Haplic Kastanozems (Aric, Loamic)) with effervescence from the surface, dry arable land, thickness of plow horizon is 30 cm, sample size is 5, Experimental station “Oroshaemaya”, Volgograd Region. Diagnostic horizons: P – agrohumus; PN – black agrohumus; AN – black humus horizon (like chernic in WRB); AB – transition humus; EL – eluvial; BEL – eluvio-illuvial (like retic properties in WRB); BT – textural (like luvic horizon with cutans in WRB); BI – clay-illuvial; BMK – xerometamorphic; BCAmc and BCAnc – accumulative-carbonate horizon with carbonate pseudomicelium (mc) and “white-eyes” (nc); BC – transition to parent material; C – parent material; small index – existence of dispersed carbonates – total effervescence by HCl.

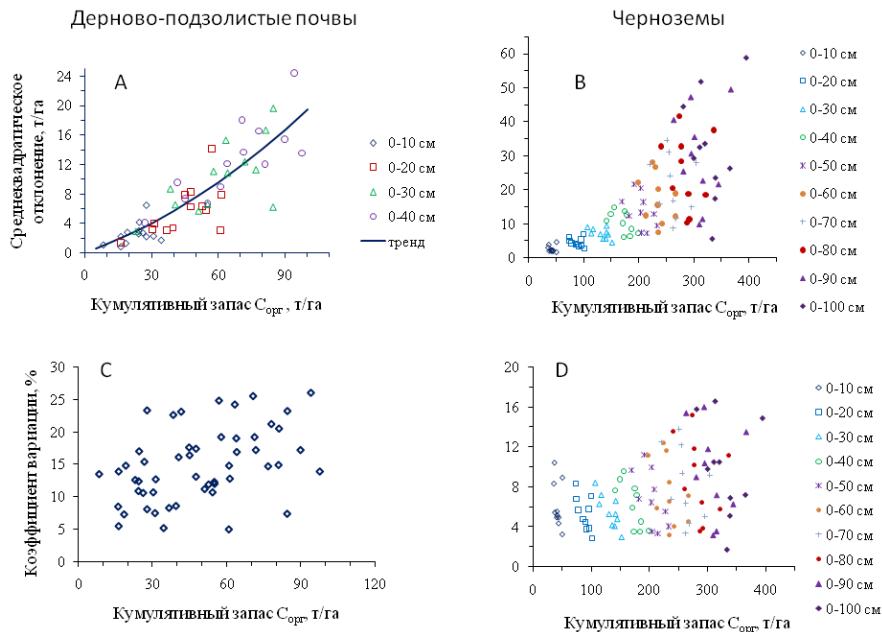


Рис. 8. Влияние мощности слоя на среднеквадратическое отклонение (A, B) и коэффициент вариации (C, D) величины кумулятивного запаса C_{org} . Почвы: А, С – дерново-подзолистые почвы, Тверская обл.; Б, Д – черноземы, Курская обл.

Fig. 8. Influence of layer thickness on standard deviation (A, B) and variation coefficient (C, D) of cumulative C_{org} storage values. Soils: А, С – soddy-podzolic soils (Albic Retisols), Tver Region; Б, Д – chernozems, Kursk Region.

По этой причине дифференцированный отбор образцов по слоям толщиной 5 или 10 см является приемом, способствующим получению приемлемых величин минимальной значимой разности содержания $C_{\text{опр}}$ и запасов $C_{\text{опр}}$ в два срока измерений для оценок возможного накопления, или наоборот, деградации содержания $C_{\text{опр}}$.

Задачи мониторинга, которые позволяет решать дифференцированный по глубине отбор образцов.

Задача 1 – получение информации о типе вертикального распределения $C_{\text{опр}}$ в пределах поверхностных горизонтов почвы, которые наиболее сильно подвержены влиянию хозяйственной деятельности человека.

По типу вертикального распределения $C_{\text{опр}}$ в пределах слоя 0–30 см, полученному в отдельный срок измерения, возможно сделать заключение о его соответствии применяемой технологии сельскохозяйственного использования почвы на земельном участке, а также предположить потенциальное направление изменения содержания $C_{\text{опр}}$ при такой технологии.

Многие технологии возделывания сельскохозяйственных культур на пашне предполагают создание однородного пахотного слоя по $C_{\text{опр}}$ и питательным элементам. При правильном их применении должно получаться равномерное вертикальное распределение $C_{\text{опр}}$ в пределах слоя 0–30 см. Значимое более низкое содержание $C_{\text{опр}}$ возле поверхности будет свидетельствовать о потенциальной деградации в будущем. Значимое более высокое содержание $C_{\text{опр}}$ возле поверхности – о потенциальном медленном накоплении $C_{\text{опр}}$ в пахотном слое.

Для технологий возделывания сельскохозяйственных культур, которые теоретически предполагают накопление органического углерода в почве, более низкое значимое содержание $C_{\text{опр}}$ возле поверхности означает серьезные нарушения технологии, способствующие деградации почвы. Равномерное вертикальное распределение $C_{\text{опр}}$ в пределах слоя 0–30 см может свидетельствовать либо о недостаточной длительности применения технологии, чтобы реализовать ее теоретический потенциал, либо об отсутствии возможности накопления $C_{\text{опр}}$ в почве с помощью такой технологии. Более высокое значимое содержание $C_{\text{опр}}$ в поверхност-

ных слоях, по сравнению с нижней частью бывшего пахотного горизонта, позволяет сделать предположение о способности почвы к накоплению C_{opr} при использовании такой технологии. В последнем случае (при наличии выраженного максимума C_{opr} возле поверхности) на основе оценки в один срок измерений допустимо делать именно только предположение. Для обоснования реального накопления C_{opr} и его предела потребуется анализ нескольких сроков измерений (т. е. через 10–15 лет, когда потенциально можно будет получить значимую разницу изменения).

Задача 2 – получение приемлемых величин минимальной значимой разности содержания C_{opr} и запасов C_{opr} в два срока измерений для оценок возможного изменения указанных показателей в ту, или иную сторону. Решение задачи становится возможным при оценке варьирования поверхностных слоев, имеющих толщину от 5 до 10 см. Увеличение толщины слоя почвы, из которого отбирают образец, сопровождается заметным увеличением среднеквадратического отклонения содержания C_{opr} и особенно запасов C_{opr} (рис. 8). В связи с этим при ведении мониторинга в следующий срок наблюдений существует высокая вероятность получить незначимые различия по запасам C_{opr} в слое 0–30 см, который принят в качестве основного показателя (FAO, 2020). Формально это будет соответствовать выводу об отсутствии изменений. На этом фоне получение значимых различий (положительных или отрицательных) по содержанию или запасам C_{opr} в более тонких слоях в пределах слоя 0–30 см позволит принять обоснованное решение о намечающейся тенденции изменения. Такую информацию уже можно будет целенаправленно использовать для анализа причин изменений и проверки моделей.

Задача 3 – получение первых оценок темпов и предела накопления C_{opr} в почве. Ее решение возможно на основе формирования временных рядов похожих объектов (одна и та же почва, положение в рельефе, почвообразующие породы и др.), заметно отличающихся периодом использования одной и той же технологии. В качестве независимой переменной может быть использовано превышение содержания C_{opr} в поверхностных слоях по сравнению с нижней частью бывшего пахотного слоя. При таком выборе независимой переменной упрощается обоснование “прочих

равных условий”, кроме времени. В этом случае достаточно будет ограничить разнообразие почв на подтиповом или родовом уровнях классификации, почвообразующих пород и элементов рельефа в пределах климатического района.

Рекомендации по дифференцированному отбору образцов почвы по глубине тонкими слоями.

Наиболее распространенной схемой может быть отбор образцов почв по слоям 0–5, 5–10, 10–20, 20–30, 30–40 см. Эта схема немного модифицируется в зависимости от средней мощности гумусового слоя на площадке и глубины поверхностных обработок, создающих ясные границы внутри пахотного слоя по плотности и структурному состоянию (рис. 9).

В почвах с мощностью гумусового горизонта более 40 см рекомендуется отбирать образцы дополнительно по 10 см до нижней границы гумусового слоя и еще один образец ниже этой границы. Эти данные необходимы для ясного представления о полных запасах органического и неорганического углерода в почвах на площадке мониторинга в начальный базовый период опробования (нулевой отсчет по времени) и позже через 30–50 лет.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для ведения мониторинга содержания и запасов $C_{\text{опр}}$ в почвах агроэкосистем предложен дифференцированный отбор образцов почв по глубине тонкими слоями. Его целью является получение приемлемых значений минимальной значимой разности содержания и запасов $C_{\text{опр}}$ при сравнении двух сроков наблюдений и статистически обоснованного представления о вертикальном распределении $C_{\text{опр}}$ в поверхностных слоях почвы в отдельный срок наблюдений.

Целесообразность дифференцированного отбора образцов почв до глубины 40 см для всех почв при ведении мониторинга содержания и запасов органического углерода определяется следующими положениями:

1. Содержание и запасы $C_{\text{опр}}$ в почвах заметно варьируют в пространстве и имеют сезонную динамику изменения в течение года (рис. 1).

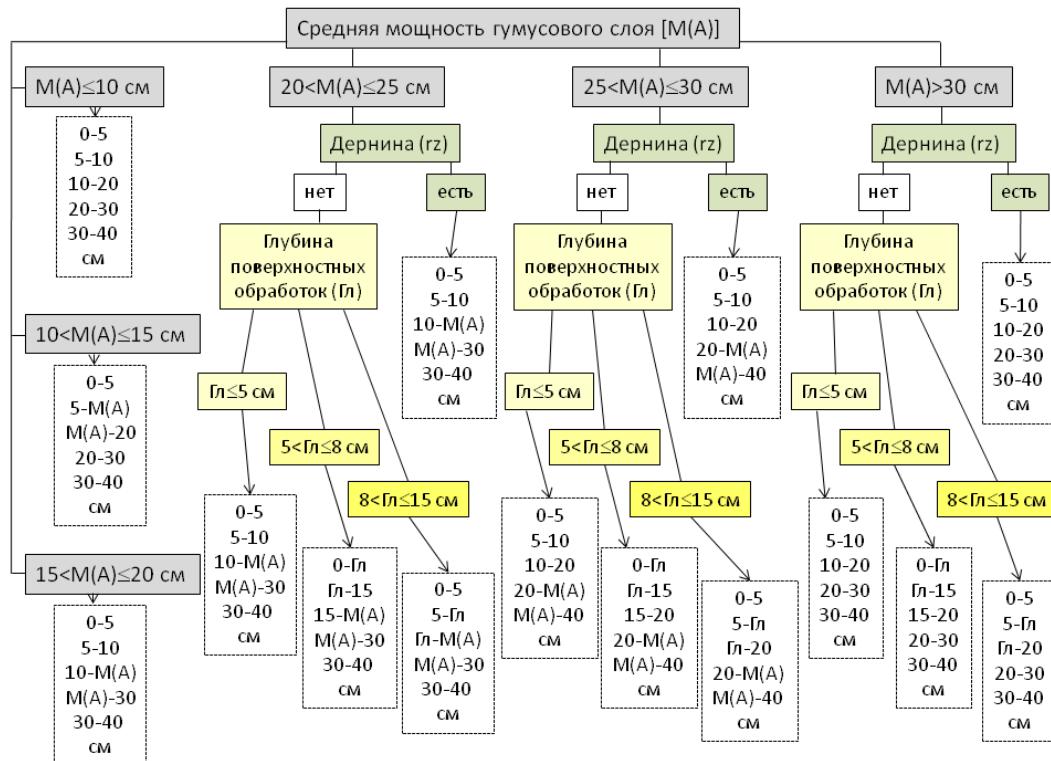


Рис. 9. Схема выбора рекомендуемой глубины дифференцированного отбора образцов почв в пределах слоя 0–40 см для определения содержания углерода и плотности в зависимости от мощности гумусового слоя ($M(A)$)², наличия дернины (rz) и глубины поверхностных механических обработок почв на сельскохозяйственных угодьях (Гл).

Fig. 9. Selection scheme of recommended depth of differential soil sampling within the layer 0–40 cm for C_{org} and bulk density determination depending on thickness of humus layer ($M(A)$)¹, existence of soil sod (rz) and depth of surface mechanical tillage of soils of agricultural lands (Гл).

² Под термином “мощность гумусового слоя” в схеме (рис. 9) понимается общая толщина всех поверхностных гумусированных горизонтов. В природных почвах это серогумусовый (AY), грубогумусовый (AO), светлогумусовый (AJ), гумусово-элювиальный (AEL), темногумусовый (AU), черногумусовый (AN), гумусово-стратифицированный (RA), а также переходный гумусовый горизонт (AB или AC). В пахотных почвах к ним добавляются агрогумусовый (P), агротемногумусовый (PU) и агрочерногумусовый (PN) (Полевой определитель почв России, 2008; Хитров и др., 2020; Хитров, Герасимова, 2021).

Definition of term “thickness of humus layer” in scheme (fig. 9) is total thickness of all surface humus horizons. In natural soils they are greyhumus (AY), moorhumus (AO), lighthumus (AJ), humus-eluvial (AEL), darkhumus (AU), blakhumus (AN), humus-stratified (RA) and transition humus (AB or AC) horizons. In arable soils additional horizons are agrohumus (P), dark agrohumus (PU) and black agrohumus (PN) (Field Guide for Identification of Russian Soils, 2008; Khitrov et al., 2020; Khitrov, Gerasimova, 2021).

2. Воспроизведимость методов определения C_{opr} в почве со-
поставима с амплитудой сезонной динамики C_{opr} (рис. 1).

3. Величина годового прироста содержания C_{opr} в почве со-
поставима или меньше аналитической воспроизведимости исполь-
зуемых методов, заметно меньше амплитуды сезонной динамики и
еще меньше по сравнению с пространственной вариабельностью
содержания C_{opr} в почве (рис. 1).

4. На основе прямых наземных измерений получение значи-
мых изменений содержания и запасов C_{opr} во времени возможно
только через 5–15 лет (рис. 2).

5. Природные почвы имеют аккумулятивный тип вертикаль-
ного распределения содержания C_{opr} с максимумом возле поверх-
ности (рис. 3).

6. При сельскохозяйственном использовании изменение со-
держания C_{opr} происходит прежде всего в поверхностных горизон-
тах (Когут и др., 2021) (рис. 4, 5).

7. В природных почвах наименьшая плотность почв харак-
терна для поверхностных горизонтов, влубь по профилю плот-
ность обычно увеличивается (рис. 6).

8. В почвах агроэкосистем профиль плотности почвы опре-
деляется технологиями использования земель, включающими раз-
ные механические обработки почвы и механическое давление
движителей на почву (рис. 7).

9. Приемлемую наименьшую значимую разность содержа-
ния и запасов C_{opr} в почве при сравнении в пространстве и во вре-
мени возможно получить при уменьшении толщины анализируе-
мого слоя почвы (рис. 8).

Выбор конкретной схемы дифференцированного отбора об-
разцов почвы тонкими слоями осуществляют в зависимости от
мощности гумусового слоя, наличия дернины и глубины поверх-
ностных механических обработок почв на сельскохозяйственных
угодьях (рис. 9).

Дифференцированный отбор образцов почв по глубине тон-
кими слоями позволяет решать дополнительные задачи монито-
ринга содержания и запасов C_{opr} в почвах агроэкосистем. Во-
первых, по информации о варианте вертикального распределения
 C_{opr} в пределах поверхностных горизонтов почвы до глубины 30–

40 см, полученной в один срок наблюдений, возможно сделать заключение о соответствии этого распределения применяемой технологии сельскохозяйственного использования почвы на земельном участке и предположить потенциальное направление изменения содержания C_{opr} при такой технологии. Варианты подобных заключений: (1) отсутствие изменения при равномерном вертикальном распределении в пахотном горизонте (рис. 4А); (2) деградация и потеря C_{opr} (рис. 4В); (3) потенциальная способность к накоплению C_{opr} в почве (рис. 4С). Во-вторых, при анализе тонких слоев повышается вероятность получения значимых различий во времени с вытекающими последствиями для принятия управлеченческих решений. В-третьих, появляется возможность планирования специальных экспериментов по оценке темпов и предела накопления C_{opr} в почвах на основе формирования хронорядов похожих почв, используемых в условиях одной и той же сельскохозяйственной технологии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Афанасьев Е.А. Черноземы Средне-Русской возвышенности. М.: Наука, 1966. 224 с.
2. Жеребцов Г.А., Коваленко В.А., Молодых С.И., Рубцова О.А. Закономерности климатических изменений в XX в. и основные физические процессы, ответственные за эти изменения // Известия Иркутского государственного университета Серия “Науки о Земле”. 2011. Т. 4. № 1. С. 87–108.
3. Когут Б.М., Семенов В.М., Артемьева З.С., Данченко Н.Н. Дегумусирование и почвенная секвестрация углерода // Агрохимия. 2021. № 5. С. 3–13.
4. МГЭИК 2006, Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов МГЭИК, 2006 г., Подготовлено Программой МГЭИК по национальным кадастрам парниковых газов, Игgleston X.C., Буэндия Л., Мива К., Нгара Т. и Танабе К. (ред.). Опубликовано: ИГЕС, Япония.
5. Национальный доклад “Глобальный климат и почвенный покров России: оценка рисков и эколого-экономических последствий деградации земель. Адаптивные системы и технологии рационального природопользования (сельское и лесное хозяйство)” /под ред. А.И. Бедрицкого. М.: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, ГЕОС, 2018. 357 с.

6. Подзолистые почвы центральной и восточной частей европейской территории СССР / под ред. А.А. Роде, Н.А. Ногиной, И.В. Забоевой. Ленинград: "Наука", Ленинградское отделение, 1980. 301 с.
7. Полевой определитель почв России. М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 2008. 182 с.
8. Результаты исследований изменений климата для стратегий устойчивого развития Российской Федерации, 2005. URL: <https://www.meteorf.gov.ru/upload/iblock/e5b/3380-Verstka-19-may-2006-A4-compr.pdf>.
9. Роде А.А., Польский М.Н. Почвы Джаныбекского стационара, их морфологическое строение, механический и химический состав и физические свойства // Труды Почвенного института им. В.В. Докучаева. Том LVI. Почвы полупустыни Северо-Западного Прикаспия и их мелиорация, по работам Джаныбекского стационара. М.: изд-во АН СССР, 1961. С. 3–214.
10. Романенков В.А., Мешалкина Ю.Л., Горбачева А.Ю., Кренке А.Н., Петров И.К., Голозубов О.М., Рухович Д.И. Карты потенциала секвестрации почвенного углерода в пахотных почвах России // Почвоведение. 2024. № 5. С. 677–692. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0032180X24050037>.
11. Сорокина Н.П., Когут Б.М. Динамика содержания гумуса в пахотных черноземах и подходы к ее изучению // Почвоведение. 1997. № 2. С. 178–184.
12. Хитров Н.Б., Безуглова О.С., Герасимова М.И. Гумусовые горизонты черноземов в системе классификации почв России: новые подходы // Живые и биокосные системы. 2020. № 32. DOI: <https://doi.org/10.18522/2308-9709-2020-32-1>.
URL: https://jbks.ru/archive/issue_32/article_1.
13. Хитров Н.Б., Герасимова М.И. Диагностические горизонты в классификации почв России: версия 2021 // Почвоведение. 2021. № 8. С. 899–910. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0032180X21080098>.
14. Хитров Н.Б., Никитин Д.А., Иванова Е.А., Семенов М.В. Пространственно-временная изменчивость содержания и запасов органического вещества почвы: аналитический обзор // Почвоведение. 2023. № 12. С. 1493–1521. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0032180X23600841>.
15. Deng L., Wang K., Zhu G., Liu Y., Chen L., Shangguan Z. Changes of soil carbon in five land use stages following 10 years of vegetation succession on the Loess Plateau, China // Catena. 2018. Vol. 171. P. 185–192. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.07.014>
16. Dondini M., Martin M., De Camillis C., Uwizeye A., Soussana J.-F.,

Robinson T., Steinfeld H. Global assessment of soil carbon in grasslands – From current stock estimates to sequestration potential. FAO Animal Production and Health Paper No. 187. Rome, FAO, 2023. DOI: <https://doi.org/10.4060/cc3981en>.

17. FAO. A protocol for measurement, monitoring, reporting and verification of soil organic carbon in agricultural landscapes – GSOC-MRV Protocol. Rome, 2020. DOI: <https://doi.org/10.4060/cb0509en>.

18. *Guillaume T., Bragazza L., Levasseur C., Libohova Z., Sinaj S.* Long-term soil organic carbon dynamics in temperate cropland-grassland systems // Agriculture, Ecosystems and Environment. 2021. Vol. 305. P. 107184. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.107184>.

19. IPCC 2019, 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, *Calvo Buendia E., Tanabe K., Kranjc A., Baasansuren J., Fukuda M., Ngarize S., Osako A., Pyrozhchenko Y., Shermanau P., Federici S.* (Eds). Published: IPCC, Switzerland.

REFERENCES

1. Afanas'eva E.A., *Chernozemy Sredne-Russkoy vozvyshennosti* (Chernozems of Central Russian Upland), Moscow: Nauka, 1966, 224 p.
2. Zhrebtssov G.A., Kovalenko V.A., Molodykh S.I., Rubtsova O.A., Zakonomernosti klimaticheskikh izmeneniy v XX v. i osnovnyye fizicheskiye protsessy, otvetstvennyye za eti izmeneniya (Patterns of climate change in the 20th century and the underlying physical processes responsible for these changes), *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta, Seriya "Nauki o Zemle"*, 2011, Vol. 4, No. 1, pp. 87–108.
3. Kogut B.M., Semenov V.M., Artem'eva Z.S., Danchenko N.N., Degumusirovaniye i pochvennaya sekvestratsiya ugleroda (Dehumification and soil carbon sequestration), *Argokhiniya*, 2021, No. 5, pp. 3–13.
4. Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T., Tanabe K. (Eds). IPCC 2006, *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* – Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Published: IGES, Japan.
5. Bedritsky A.I. (Ed.), National report “*Global climate and soil cover of Russia: assessment of risks and environmental and economic consequences of land degradation. Adaptive systems and technologies for rational environmental management (agriculture and forestry)*”, Moscow: Dokuchaev Soil Scince Institute, GEOS, 2018, 357 p.
6. Rode A.A., Nogina N.A., Zaboeva I.V. (Eds.), *Podzolistyye pochyvy tsentral'noy i vostochnoy chastej evropeyskoy territorii SSSR* (Podzolic soils of central and eastern parts of European territory of the USSR), Leningrad:

- “Nauka”, Leningradskoe otdelenie, 1980, 301 p.
7. *Polevoy opredelitel' pochv Rossii* (Field Guide for Identification of Russian Soils), Moscow: Dokuchaev Soil Science Institute, 2008, 182 p.
8. *Results of climate change research for sustainable development strategies of the Russian Federation*, 2005, URL: <https://www.meteorf.gov.ru/upload/iblock/e5b/3380-Verstka-19-may-2006-A4-compr.pdf>.
9. Rode A.A., Pol'sky M.N., Pochvy Dzhanybekskogo statcionara, ikh morfologicheskoye stroyeniye, mekhanicheskiy i khimicheskiy sostav i fizicheskiye svoystva (Soils of the Dzhanybek station, their morphological structure, mechanical and chemical composition and physical properties), Proc. of the V.V. Dokuchaev Soil Science, Vol. LVI, *Soils of the semi-desert of the North-Western Caspian region and their reclamation, according to the work of the Dzhanybek station*, Moscow: Izd-vo AN SSSR, 1961, pp. 3–214.
10. Romanenkov V.A., Meshalkina J.L., Gorbacheva A.Yu., Krenke A.N., Petrov I.K., Golozubov O.M., Rukhovich D.I., Soil Organic Carbon Sequestration Potential Maps in the Russian Cropland, *Eurasian Soil Science*, 2024, Vol. 57, No. 5, pp. 737–750, DOI: <https://doi.org/10.1134/S106422932360375X>.
11. Sorokina N.P., Kogut B.M., Dinamika soderzhaniya gumusa v pakhotnykh chernozemakh i podkhody k yeye izucheniyu (Dynamics of humus content in arable chernozems and approaches to its study), *Pochvovedenie*, 1997, No. 2, pp. 178–184.
12. Khitrov N.B., Besuglova O.S. Gerasimova M.I., Humus horizons of chernozems in the soil classification of Russia: new approaches, *Living and bioinert systems*, 2020, No. 32, DOI: <https://doi.org/10.18522/2308-9709-2020-32-1>, URL: <https://jbks.ru/archive/issue-32/article-1>.
13. Khitrov N.B., Gerasimova M.I., Diagnosticheskiye gorizonty v klassifikatsii pochv Rossii: versiya 2021, *Eurasian Soil Science*, 2021, Vol. 54, No. 8, pp. 1131–1140. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229321080093>.
14. Khitrov N.B., Nikitin D.A., Ivanova E.A., Semenov M.V., Variability of the content and stock of soil organic matter in time and space: an analytical review, *Eurasian Soil Science*, 2023, Vol. 56, No. 12, pp. 1819–1844, DOI: <https://doi.org/10.1134/S106422932360207X>.
15. Deng L., Wang K., Zhu G., Liu Y., Chen L., Shangguan Z., Changes of soil carbon in five land use stages following 10 years of vegetation succession on the Loess Plateau, China, *Catena*, 2018, Vol. 171, pp. 185–192, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.07.014>.
16. Dondini M., Martin M., De Camillis C., Uwizeye A., Soussana J.-F., Robinson T., Steinfeld H., Global assessment of soil carbon in grasslands – From current stock estimates to sequestration potential. *FAO Animal*

Production and Health Paper, 2023, No. 187, Rome, FAO, DOI:
<https://doi.org/10.4060/cc3981en>.

17. FAO, *A protocol for measurement, monitoring, reporting and verification of soil organic carbon in agricultural landscapes – GSOC-MRV Protocol*, Rome, 2020, DOI: <https://doi.org/10.4060/cb0509en>.

18. Guillaume T., Bragazza L., Levasseur C., Libohova Z., Sinaj S., Long-term soil organic carbon dynamics in temperate cropland-grassland systems, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2021, Vol. 305, pp. 107184, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.107184>.

19. Calvo Buendia E., Tanabe K., Kranjc A., Baasansuren J., Fukuda M., Ngarize S., Osako A., Pyrozhenko Y., Shermanau P., Federici S. (Eds), IPCC 2019, *Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, Published: IPCC, Switzerland, 2019.



Ссылки для цитирования:

Артемьева З.С., Когут Б.М., Цомаева Е.В., Засухина Е.С., Ярославцева Н.В., Никитин Д.А. Содержание и состав органического вещества почв архипелага Новая Земля // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2025. Вып. 125. С. 214-243. DOI: 10.19047/0136-1694-2025-125-214-243

Cite this article as:

Artemyeva Z.S., Kogut B.M., Tsomaeva E.V., Zasukhina E.S., Yaroslavtseva N.V., Nikitin D.A., Content and composition of organic matter in soils of the Novaya Zemlya archipelago, Dokuchaev Soil Bulletin, 2025, V. 125, pp. 214-243, DOI: 10.19047/0136-1694-2025-125-214-243

Содержание и состав органического вещества почв архипелага Новая Земля

© 2025 г. З. С. Артемьева^{1*}, Б. М. Когут^{1***}, Е. В. Цомаева^{1****},
Е. С. Засухина^{2*****}, Н. В. Ярославцева^{1*****}, Д. А. Никитин^{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/0000-0002-0565-2812>,

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

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

*****<https://orcid.org/0000-0002-8533-6536>.

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

Поступила в редакцию 19.09.2024, после доработки 24.03.2025,
принята к публикации 16.09.2025

Резюме: Впервые с помощью метода грануло-денсиметрического фракционирования с ультразвуковой диспергацией исследован компонентный состав органического вещества пелоземов сильноскелетных остаточно-карбонатных (Skeletal Leptosols (Loamic)), карбопетроземов (Calcaric Leptosols (Protic)), петроземов (Skeletal Leptosols (Protic)) и криоземов (Oxyaquic Cryosols (Loamic)) северной

части архипелага Новая Земля. Показано, что вне зависимости от глубины залегания горизонтов во всех исследованных почвах углерод (С) в дискретном органическом веществе (свободное – ЛФ_{СВ} и агрегированное – ЛФ_{АГР}) на 94–96% (в среднем) представлен органическим С (C_{опр}), в илистой фракции и остатке вклад C_{опр} снижается до 87 и 54% от C_{общ} фракции. Уровень накопления C_{опр} в различных фракциях во многом определяет микробиологическую активность почв. Коэффициент корреляции (R^2 , $p < 0.05$) между C_{опр} конкретных фракций (%) в почве) и содержанием микробной биомассы снижается в следующем ряду: ЛФ_{АГР} (0.59) > МА (0.53) > ЛФ_{СВ} (0.50) > ил (0.36) > остаток (0.26), отражая важную роль структурных единиц почвы, в частности, неустойчивых в ультразвуковом поле микроагрегатов (МА), в обеспечении благоприятных экологических условий для функционирования микробиоты.

Ключевые слова: Арктика; экстремальные экосистемы; перигляциальная зона ледника; органическое вещество; гранулометрическое фракционирование; биомасса микроорганизмов.

Content and composition of organic matter in soils of the Novaya Zemlya archipelago

© 2025 Z. S. Artemyeva^{1*}, B. M. Kogut^{1**}, E. V. Tsomaeva^{1***}, E. S. Zasukhina^{2****}, N. V. Yaroslavtseva^{1*****}, D. A. Nikitin^{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/0000-0002-0565-2812>,

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

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

*****<https://orcid.org/0000-0002-8533-6536>.

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

Received 19.09.2024, Revised 24.03.2025, Accepted 16.09.2025

Abstract: For the first time, the composition of organic matter (OM) in strongly skeletal residual carbonate pelozems (Skeletal Leptosols (Loamic)), carbopetrozems (Calcaric Leptosols (Protic)), petrozems (Skeletal Leptosols (Protic)) and cryozems (Oxyaquaic) in the northern part of the Novaya Zemlya archipelago was studied using granulometric fractionation. It has been shown

that, regardless of the depth of the horizons in all studied objects, carbon in particulate OM (free – LF_{fr} and occluded – LF_{occ}) is 94–96% (on average) represented by organic C (C_{org}), in the clay fraction and the residue, the share of C_{org} decreases to 87 and 54% of the C_{total} in fraction. The level of C_{org} accumulation in various fractions largely determines the microbiological activity in the studied soils. The correlation coefficient (R^2 , $P < 0.05$) between C_{org} of specific fractions (% in soil) and the content of microbial biomass decreases in the following order: LF_{occ} (0.59) > mA (0.53) > LF_{fr} (0.50) > clay (0.36) > residue (0.26), reflecting the important role of soil structural units, in particular, microaggregates within aggregates (mA) that are unstable in the ultrasonic field, in providing comfortable environmental conditions for the microbiota.

Keywords: Arctic; extreme ecosystems; periglacial glacier zone; organic matter; granulo-density fractionation; biomass of microorganisms.

ВВЕДЕНИЕ

Архипелаг Новая Земля остается слабоизученным в силу наличия на его территории полигона для испытаний ядерного оружия (с 1954 г. до 90-х гг. XX в.) и, как следствие, крайне ограниченного к нему доступа. Но с 2009 г., благодаря появлению национального парка “Русская Арктика”, самой северной и наибольшей по площади особо охраняемой территории России, появилась возможность исследовать эти в прошлом “белые пятна” на территории архипелага. Комплексное изучение Арктики и Антарктики в настоящее время приобретает все большее значение, так как с конца XX в. температура воздуха за полярным кругом выросла в среднем на 2 °C (Post et al., 2019), что повлияло на арктические ландшафты, которые стали активно покрываться тундрой и растительностью.

На формирование рельефа архипелага большое влияние оказали оледенения как прошлые, так и современное. Эти события придали ландшафту черты высокогорий. В рельефе архипелага присутствуют как горные массивы, так и равнинная местность. Абсолютные высоты в некоторых точках превышают 1 000 м. На островах Северный и Южный наблюдается высокогорный рельеф. Более подробное описание физико-географических характеристик архипелага Новая Земля приведено в работе (Семенков, 2020).

Начало современного этапа исследования почв Арктики было положено в конце прошлого столетия (Горячkin и др., 1998) и вновь продолжено с 2017 г. благодаря развитию национального парка “Русская Арктика” и проекта “Арктический плавучий университет” (Крупская и др., 2017; Мирошников и др., 2017). Результатом этих исследований стали пионерные данные по геологии и геохимии этой уникальной территории. Широкое покрытие местности скалами и каменистыми россыпями, накопление мелкозема на поверхности снежников и ледников (Крупская и др., 2017), наряду с чрезвычайно суровыми климатическими условиями во многом обуславливают слабую развитость почвообразовательных процессов.

В связи с современными климатическими вызовами, связанными с проблемой парникового эффекта, обусловленными в значительной степени углеродсодержащими газами, арктический регион приобретает стратегически важное с научной точки зрения значение. Поэтому на данный момент в России усиленное внимание сосредоточено на изучении природы органического вещества (ОВ) в почвах этого уникального региона. В условиях чрезвычайно сурового климата, распространения сплошной многолетней мерзлоты, низкой суммы положительных температур интенсивность минерализации и гумификации ОВ арктических почв крайне слаба. Поэтому исследование ОВ этих своеобразных почв требует специальных методов и подходов (Артемьева и др., 2016). Для специфических условий педогенеза на Крайнем Севере и, в частности, гумусообразования, помимо традиционных методов изучения содержания, состава и природы гумуса почв (Кононова, 1963; Орлов, 1974; Тюрин, 1937), большое значение имеет развивающееся в последнее время направление исследования ОВ на основе физического фракционирования почв, с особым акцентом на изучение детрита, представляющего исходный материал для формирования почвенного гумуса (Артемьева, Федотов, 2013).

В настоящее время в качестве перспективного способа разделения химически и биологически наиболее гомогенных органоминеральных компонентов представляет метод гранулоденситического фракционирования с выделением группы легких фракций с плотностью $< 1.8 \text{ г}/\text{см}^3$ – “свободное” и “агрегиро-

ванное” ОВ, и ОВ илистой фракции и остатка. Эффективность использования такого варианта обусловлена прежде всего тем, что он обеспечивает отделение основной массы ОВ от тонкодисперсных минеральных компонентов почв, что существенно, в частности, для выявления роли последних в аккумуляции и формировании устойчивого пула С. Данный экспериментальный способ открывает возможности для использования функционально значимых пулов ОВ в качестве инструмента уточнения генетических особенностей почв и экологических условий (гидрологических и термических параметров) их формирования. Следует отметить, что этот подход был уже ранее с успехом использован при изучении почв Крайнего Севера, в том числе погребенной торфяной почвы (озеро Белое) (Артемьева и др., 2016).

Цель работы – изучить содержание ОВ и его компонентный состав, в определенной степени взаимосвязанный с функционированием микробоценоза почв о. Северный архипелага Новая Земля.

Объекты и методы

Объекты исследования расположены на о. Северный архипелага Новая Земля. В качестве почвообразующих пород преобладают дериваты карбонатных глинистых сланцев и алевролитов, а также известняков – сильнощебнистые, преимущественно карбонатные суглинки и глины (Семенков, 2020).

Климат – морской арктический, среднегодовые температуры составляют -8 и -10 °C (Русская Гавань и Мыс Желания), средние температуры июля – $+4.2$ и $+1.8$ °C (Мосеев, 2017). Количество осадков – 320–340 мм/год (Грищенко, 2009). Отбор образцов проводился во второй половине июля 2018 г. в ходе экспедиции по проекту “Арктический плавучий университет”. Согласно Классификации почв (Классификация ..., 1977), учитывая региональные особенности Арктики (Ананко и др., 2020), и международной классификации (WRB, 2022), изученные почвы отнесены к пелоземам сильноскелетным остаточно-карбонатным (Skeletal Leptosols (Loamic)), карбопетrozемам (Calcaric Leptosols (Protic)), петроземам (Skeletal Leptosols (Protic)) и криоземам (Oxyaquic Cryosols (Loamic)). Более подробная информация о местонахождении, о некоторых химических и физических свойствах этих почв представлена ранее (Никитин и др., 2021а, б).

Были исследованы почвы на следующих объектах:

- Мыс Желания:** Криозем остаточно-карбонатный сильно скелетный (р. 1)
N 76°93'21", E 68°46'90";
Петrozем криотурбированный остаточно-карбонатный сильно скелетный (р. 2)
N 76°95'52", E 68°49'02".
- Ледяная Гавань:** Карбопетрозем очень сильно скелетный (р. 3)
N 76°17'54", E 68°09'11";
Пелозем гумусовый криотурбированный остаточно-карбонатный сильно скелетный (р. 4)
N 76°17'51", E 68°09'14";
Пелозем гумусовый перегнойный остаточно-карбонатный сильно скелетный (р. 5)
N 76°17'44", E 68°08'55".
- Русская Гавань:** Криозем глееватый скелетный (р. 6)
N 76°11'288", E 62°40'196";
Петrozем (р. 7)
N 76°10'937", E 62°42'98";
Карбопетрозем гумусовый мерзлотный сильно скелетный (р. 8)
N 76°10'912", E 62°43'825";
Пелозем остаточно-карбонатный сильно скелетный (р. 9)
N 76°10'789", E 62°45'389".
- Бухта Благополучия:** Пелозем гумусовый остаточно-карбонатный средне скелетный (р. 10)
N 75°37'25", E 63°48'51";
Криозем грубогумусовый остаточно-карбонатный (р. 11)
N 75°37'41", E 63°47'46".

В настоящей работе использован метод гранулоденсиметрического фракционирования почв с ультразвуковой диспергацией, полная схема которого была представлена ранее (Artemyeva et al., 2021). Схема фракционирования выглядит следующим образом. С помощью бромоформ-этанольной смеси (БЭС) выделяли свободное ОВ (ЛФ_{СВ} – легкие фракции плотностью < 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 БЭС выделяли агрегированное ОВ (ЛФ_{АГР} – легкие фракции плотностью < 1.8 г/см³). Повторность трехкратная.

Таким образом, примененный метод позволяет выделить четыре пула ОВ: неагрегированное (свободное) ОВ (ЛФ_{СВ}), агрегированное ОВ (ЛФ_{АГР}), ОВ ила (Ил) и остатка (Ост).

Кроме того, используя данную схему фракционирования, почву можно разделить на две группы микроагрегатов, различающихся по степени устойчивости к диспергирующему действию ультразвука. Крупные (50–250 мкм) микроагрегаты, неустойчивые в ультразвуковом (УЗ) поле (mA), состоят из органических остатков разной степени минерализации-гумификации (ЛФ_{АГР}) и глинистых частиц (Ил). Связь между компонентами слабая, поэтому они легко высвобождаются под влиянием кавитации. Мелкие (1–50 мкм) микроагрегаты, устойчивые в УЗ поле, представлены во фракции остатка (Ост).

Содержание углерода (общего ($C_{общ}$) и неорганического ($C_{неопр}$)), как и общего азота (N) в пробах почв и гранулоденсиметрических фракциях определяли методом каталитического сжигания на анализаторе TOC Analyzer (Shimadzu, Japan). При этом содержание $C_{опр}$ в анализируемых пробах определяли по разности между $C_{общ}$ и $C_{неопр}$ (определяли в одной пробе до и после разрушения карбонатов 10%-ной HCl). Все измерения были выполнены в двухкратной повторности.

Статистическую обработку результатов выполняли с использованием пакета Microsoft Excel 2010. Выбранный уровень

значимости был $p < 0.05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Закономерности аккумуляции массы основных органо-минеральных фракций

Свободное ОВ (ЛФ_{СВ}, плотность < 1.8 г/см³)

Количество ЛФ в почвах исследованных объектов значительно варьирует (рис. 1). Если в органогенном горизонте (СJ-22) криозема р. 1 объекта **Мыс Желания** масса ЛФ закономерно выше (более чем наполовину состоит из свободного ОВ (ЛФ_{СВ})), по сравнению с таковым нижележащего горизонта (СJ-23), где ЛФ_{СВ} практически отсутствует – (< 1%), то в р. 2 (петроземе криотурбированном остаточно-карбонатном сильно скелетном) четко прослеживаются признаки погребения горизонта (СJ-25), обогащенного свободным ОВ (ЛФ_{СВ}), что, по-видимому, является следствием криотурбационных процессов (например, подстилка (надземная или корневая) опускается вниз и перемешивается с более глубокими слоями), широко распространенных на территории архипелага (рис. 1). Кроме того, свободное ОВ также может быть включено в более глубокие слои из-за повторного отложения богатого органикой аллювиального материала или длительного отложения ОВ в торфах. После погребения ОВ неблагоприятные климатические условия (низкие температуры и промерзание почвы) будут препятствовать его разложению (Gerzabek et al., 2004; Bockheim et al., 2006),

На объекте **Ледяная Гавань** по содержанию свободного ОВ (ЛФ_{СВ}) явно выделяется пелозем р. 5: его верхний горизонт (LG-15) более чем на 25% представлен именно свободным ОВ. Образцы почв, отобранные из двух других разрезов этого объекта, характеризуются значительно мёньшим содержанием ЛФ_{СВ} – почти в 3 раза (гор. LG-12 – пелозем), а в гор. LG-11 (карбопетрозем р. 3) свободное ОВ практически отсутствует (< 0.1%). Распределение ЛФ_{СВ} по профилю имеет хорошо выраженный аккумулятивный характер – его количество резко уменьшается с глубиной, не достигая 0.1%.

Для почв объекта **Бухта Благополучия** (пелозем р. 10 и криозем р. 11) отмечены существенные различия в содержании ЛФ_{СВ}: в пелоземе количество ЛФ_{СВ} составляет < 0.1%, тогда как в криоземе оба вскрытых горизонта (ВВ-9 и ВВ-10) характеризуются значительно большим количеством ЛФ_{СВ} (более чем на порядок). При этом в криоземе наблюдаются признаки погребения: нижний горизонт (ВВ-10) содержит в 2.5 раза больше свободного ОВ (ЛФ_{СВ}) по сравнению с таковым в верхнем горизонте (ВВ-9) (рис. 1).

На объекте **Русская Гавань** лишь в криоземе (р. 6) обнаружено небольшое количество ЛФ_{СВ} (2–3%) (гор. RG-1, RG-2), в то время как в петrozеме (р. 7), карбопетrozеме (р. 8) и пелоземе (р. 9) свободное ОВ практически отсутствует (< 0.1%) (рис. 1).

Агрегированное ОВ (ЛФ_{АГР}, плотность < 1.8 г/см³)

Мыс Желания. По уровню накопления агрегированного ОВ (ЛФ_{АГР}) верхние горизонты криозема (р. 1) и петрозема (р. 2) различаются несущественно: его содержание составляет ~ 0.2%. Исключение отмечено лишь в гор. CJ-25, где оно составляет < 0.1% (рис. 1). Распределение агрегированного ОВ в почвенных профилеах обоих разрезов носит аккумулятивный характер.

Следует отметить, что общее содержание дискретного ОВ (ЛФ_{СВ}, ЛФ_{АГР}) по всему профилю криозема на порядок выше по сравнению с таковым в петроземе. При этом компонентный состав дискретного ОВ в почвах данного объекта различен: в гор. CJ-22 и CJ-25 (криозема и петрозема соответственно) абсолютно преобладает свободное ОВ (почти 100% массы Σ_{ЛФ}), а в гор. CJ-23 и CJ-24 (криозема и петрозема соответственно) дискретное ОВ представлено в большей степени агрегированным ОВ: 82 и 79% массы Σ_{ЛФ} (криозема и петрозема соответственно).

Ледяная Гавань. Из трех почв на данном объекте лишь в карбопетrozеме (р. 3) количество ЛФ_{АГР} незначительно – едва достигает 0.2% (рис. 1). Верхние горизонты пелоземов остальных двух разрезов (4 и 5) характеризуются значительно большим содержанием ЛФ_{АГР} – оно в них практически одинаковое (~ 4%).

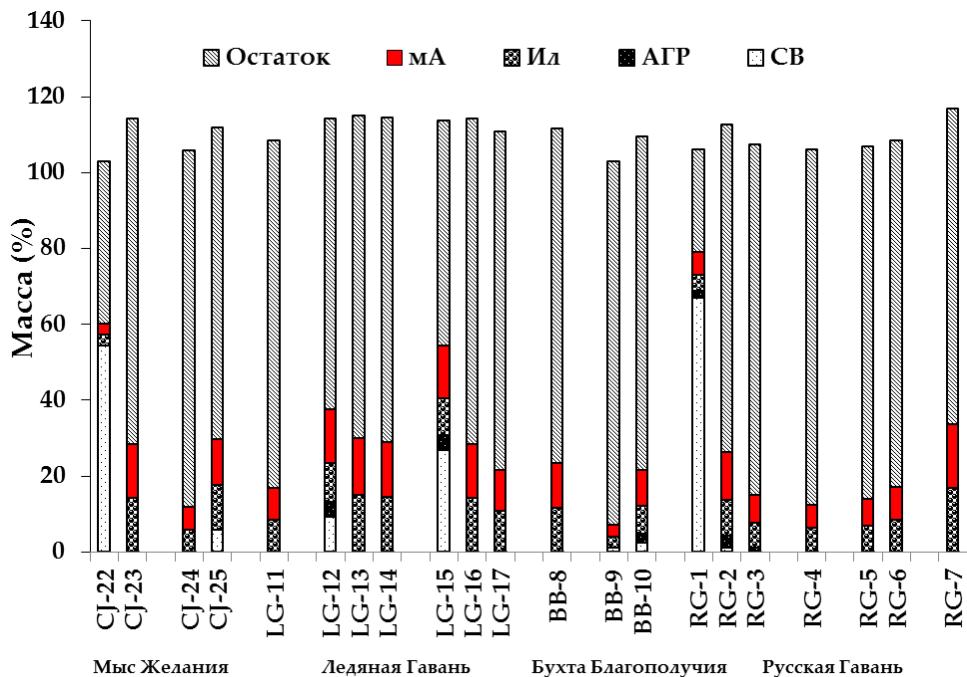


Рис. 1. Компонентный состав исследованных объектов.

Fig. 1. Component composition of the studied objects.

Однако характер распределения ЛФ_{АГР} по профилю в этих разрезах кардинально разный: если в почве р. 5 он аккумулятивный, то в р. 4 очевидны признаки погребения, скорее всего, как следствие криотурбационных процессов.

Компонентный состав дискретного ОВ в верхних горизонтах пелоземов рр. 4 и 5 одинаков – на 70–87% (на массу $\Sigma_{ЛФ}$) оно состоит из ЛФ_{СВ}, а в нижних – преимущественно из ЛФ_{АГР}. Исключение отмечено лишь для гор. LG-17, где дискретное ОВ состоит примерно поровну из этих двух фракций (рис. 1).

Русская Гавань. Почвы данного объекта различаются как по количеству ЛФ_{АГР}, так и по характеру его распределения по профилю. В верхнем горизонте (RG-1) криозема р. 6 количество ЛФ_{АГР} в 1.6 раза меньше по сравнению с таковым в нижележащем горизонте (RG-2), и далее оно снижается вниз по профилю: в гор. RG-3 количество ЛФ_{АГР} более чем в 3.5 раза ниже по сравнению с таковым в гор. RG-2 (рис. 1). Тем не менее, распределение дискретного ОВ (ЛФ_{СВ} и ЛФ_{АГР}) в почвенном профиле криозема носит аккумулятивный характер. При этом в верхнем горизонте (RG-1) оно практически полностью представлено ЛФ_{СВ} (97% на массу $\Sigma_{ЛФ}$), а в нижележащих горизонтах (RG-2 и RG-3) – преимущественно ЛФ_{АГР} (74–80% массы $\Sigma_{ЛФ}$).

Для карбопетрозема р. 8 отмечено увеличение общего количества дискретного ОВ ($\Sigma_{ЛФ}$) в нижележащем горизонте RG-6 по сравнению с таковым гор. RG-5; однако содержание ЛФ_{СВ} в последнем больше (почти в 1.4 раза) по сравнению с таковым в гор. RG-6 (рис. 1). Содержание ЛФ_{АГР} в гор. RG-6 выше по сравнению с таковым в вышележащем гор. RG-5 (в 1.9 раза), что свидетельствует в пользу погребения гор. RG-6, по-видимому, в результате криотурбационных процессов. Соответственно, состав дискретного ОВ в р. 10 представлен преимущественно агрегированным ОВ (ЛФ_{АГР}): 71–87% от $\Sigma_{ЛФ}$.

Бухта Благополучия. Для ЛФ_{АГР} почв данного объекта наблюдаются тенденции, аналогичные отмеченным ранее для ЛФ_{СВ}: в профиле криозема (р. 11) четко прослеживается погребенный гор. BB-10 с повышенным, по сравнению с таковым вышележащего гор. BB-9, содержанием ЛФ_{АГР} (более чем в 20 раз) (рис. 1).

Дискретное ОВ в пелоземе (р. 10) почти на 90% представлено ЛФ_{АГР}, в отличие от криозема, где верхний горизонт (ВВ-9) практически полностью состоит из ЛФ_{СВ} (более 90% массы Σ_{ЛФ}), тогда как состав дискретного ОВ в нижележащем гор. ВВ-10 примерно поровну представлен ЛФ_{СВ} и ЛФ_{АГР} (рис. 1).

Илистая фракция (< 1 мкм)

Содержание илистной фракции во всех объектах в среднем составляет 9.3% с минимальным количеством в органогенных горизонтах (СJ-22 и RG-1): 2.7 и 4.2% соответственно. Повышенные количества илистной фракции, как правило, отмечены в нижних горизонтах всех объектов, за исключением пелоземов (рр. 4, 5), а также криозема (р. 6), где зафиксировано незначительное снижение содержания ила вниз по профилю (гор. LG-14, LG-17, RG-3 соответственно) (рис. 1). Максимально тяжелым гранулометрическим составом выделяется пелозем р. 9 с содержанием илистной фракции > 16% (16.8%) (рис. 1).

Микроагрегаты внутри агрегатов (неустойчивые в УЗ-поле) – мА – состоят из ЛФ_{АГР} (ядро) и илистых частиц, капсулирующих ядро микроагрегатов.

Количество структурных отдельностей такого рода, как правило, согласуется с содержанием илистной фракции в почве (рис. 1). Соответственно, максимальное количество мА наблюдается в наиболее тяжелых по гранулометрическому составу горизонтах. Следует отметить, что пелозем р. 4 (гор. LG-12 – LG-14) объекта **Ледянная Гавань** отличается от почв остальных объектов наиболее равномерным распределением содержания мА по почвенному профилю. Количество мА в пелоземе р. 4 колеблется в очень узких пределах (14.2–15.0% на массу почвы), что наиболее близко к максимально наблюдаемому (16.7% на массу почвы в р. 9) в исследуемых объектах.

Фракция остатка

В состав фракции остатка входят крупнозернистый минеральный компонент (преимущественно первичные минералы), устойчивые в УЗ-поле микроагрегаты, с незначительной примесью лигниноподобных и углеподобных веществ (Артемьева, Фе-

дотов, 2013). Фракция остатка в почвах изученных объектов, как правило, преобладает над остальными фракциями и достигает 77–96%. Исключение отмечено лишь для органогенных горизонтов (CJ-22 и RG-1), где содержание фракции остатка в почве составляет 42.8 и 26.9% соответственно (рис. 1).

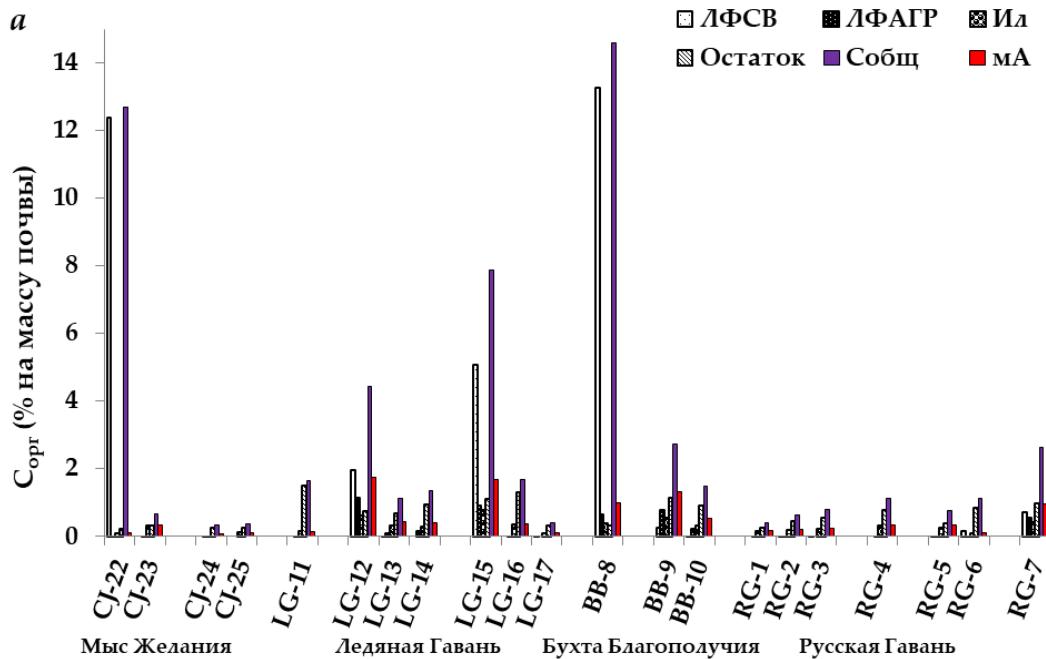
Качественный состав ОВ почв рассмотренных объектов

Мыс Желания. По уровню накопления C_{opr} почвы данного объекта существенно различаются: в гор. CJ-22 криозема р. 1 его содержание в 38 раз превышает таковое в гор. CJ-24 петrozема р. 2 (рис. 2), что обусловлено, в первую очередь, компонентным составом ОВ почв данных разрезов. В первом случае C_{opr} почвы практически полностью представлено $\text{ЛФ}_{\text{СВ}}$ (почти 98% от C_{opr} почвы), на долю C_{opr} илистой фракции и остатка приходится менее 1 и 1.6% от C_{opr} почвы соответственно (табл. 1). Во втором случае (петрозем р. 2) свободное ОВ ($\text{ЛФ}_{\text{СВ}}$) отсутствует, дискретное ОВ состоит лишь из $\text{ЛФ}_{\text{АГР}}$, на долю которого приходится < 5%, а подавляющая часть C_{opr} почвы представлена илистой фракцией и остатком (21 и 75% от C_{opr} почвы соответственно).

Следует отметить, что углерод свободного ОВ в гор. CJ-22 криозема р. 1 практически нацело представлен C_{opr} , доля $C_{\text{неopr}}$ не превышает 0.3% от $C_{\text{СВ}}$ (табл. 1).

Качественный состав $\text{ЛФ}_{\text{СВ}}$ в гор. CJ-22 криозема р. 1 свидетельствует о значительной его обедненности азотом ($\text{C/N} = 30$), что, вероятно, связано с повышенной микробной биомассой в этом горизонте среди всех изученных разрезов данного объекта (170 против 23–60 мкг/г почвы в гор. CJ-23 – CJ-25) (Никитин и др., 2021b) (рис. 3).

Состав $\text{ЛФ}_{\text{АГР}}$ в рассматриваемых почвах свидетельствует о существенном “загрязнении” дискретного ОВ тонкодисперсным минеральным компонентом, что отражается в пониженных величинах концентрации C_{opr} (8–15.2% на массу фракции). Ранее было выявлено, что в составе $\text{ЛФ}_{\text{АГР}}$ всегда присутствует минеральный компонент, тем не менее, величина концентрации С для $\text{ЛФ}_{\text{АГР}}$ оставалась выше 20% на массу фракции (Федотов, Артемьева, 2015).



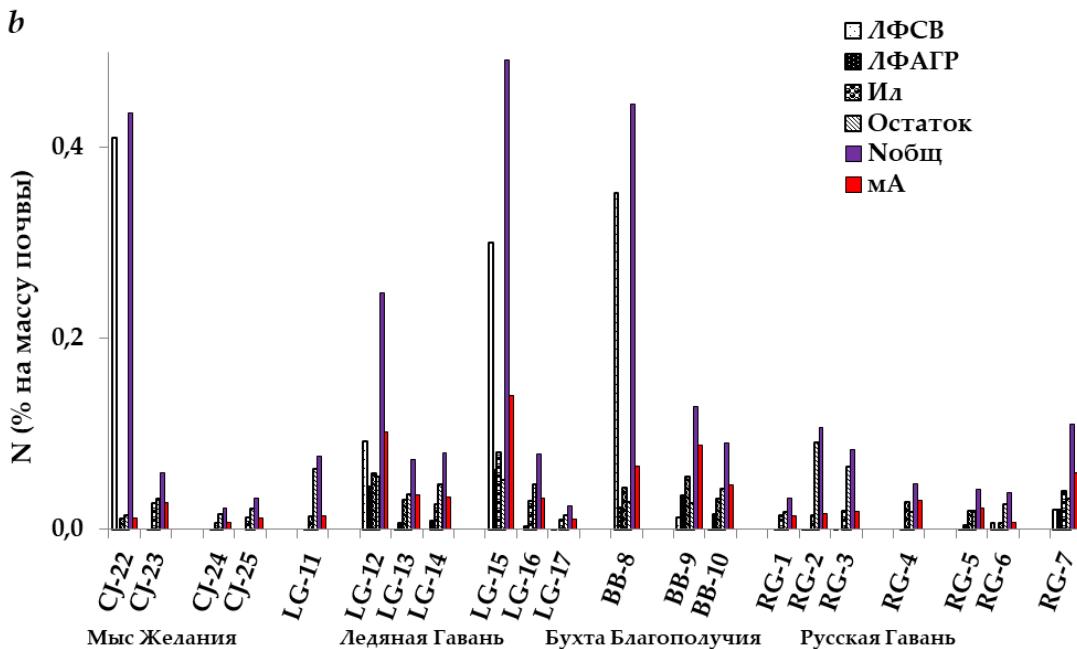


Рис. 2. Содержание углерода (% на массу почвы) (а), азота (% на массу почвы) (б) в разных фракциях.
Fig. 2. Carbon content (% in soil) (a), nitrogen (% in soil) (b) in different fractions.

Таблица 1. Доли $C_{\text{орг}}$ и $C_{\text{неорг}}$ в разных органо-минеральных фракциях исследованных объектов
Table 1. Proportions of C_{org} and C_{inorg} in different organo-mineral fractions of the studied objects

Объект	№ разреза	Почва	Горизонт	ЛФ _{СВ}		ЛФ _{АГР}		Ил		Остаток		mA	
				$C_{\text{неорг}}$	$C_{\text{орг}}$								
				% в TOC	% в TOC								
Мыс Желания	1	Криозем	CJ-22		100	69	31	2	98	10	90	18	82
			CJ-23				100	5	95	42	58	4	96
			CJ-24			2	98	10	90	28	72	9	91
	2	Петrozем	CJ-25					12	88	35	65	12	88
Ледяная Гавань	3	Карбопетрозем Пелозем	LG-11			23	77	46	54	74	26	45	55
	4		LG-12	2	98	1	99	4	96	54	46	2	98
			LG-13	6	94	1	99	15	85	63	37	12	88
			LG-14			1	99	16	84	51	49	12	88
	5	Пелозем	LG-15	3	97	1	99	6	94	59	41	4	96
			LG-16			2	98	15	85	63	37	14	86
			LG-17	1	99			15	85	44	56	15	85
Бухта Благополучия	10	Пелозем Криозем	BB-8		100	4	96	29	71	58	42	25	75
	11		BB-9	1	99	1	99	14	86	29	71	13	87
			BB-10		100		100	3	97	12	88	1	99
	6	Криозем	RG-1	1	99		100	6	94	31	69	3	97
			RG-2		100		100	1	99	11	89	1	99
			RG-3		100	1	99	3	97	29	71	2	98
Русская Гавань	7	Петrozем Карбопетрозем	RG-4			100	5	95	51	49	5	95	
	8		RG-5	29	71	6	94	26	74	85	15	24	76
			RG-6	5	95	1	99	20	80	82	18	20	80
	9	Пелозем	RG-7			1	99	12	88	61	39	11	89

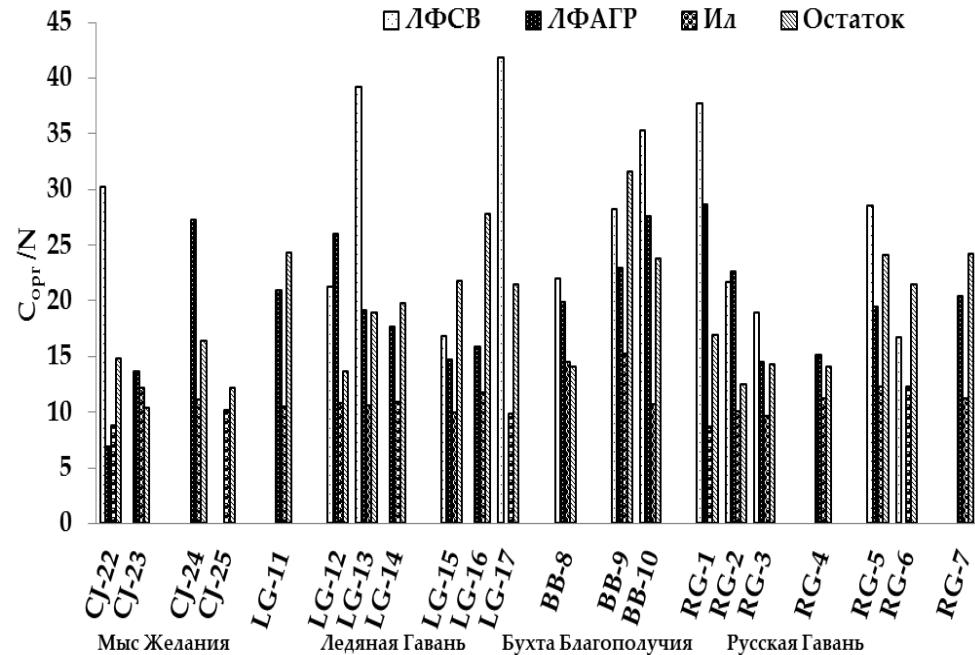


Рис. 3. Величина отношения C_{org}/N в арктических почвах.
 Fig. 3. The C_{org}/N ratio in arctic soils.

Наличие значительных количеств тонкодисперсного минерального компонента может быть следствием особенностей минералогического состава почв изученного объекта.

В условиях периодических циклов замерзания/оттаивания велика вероятность физического нарушения кристаллической решетки глинистых минералов, провоцирующих образование глинистых ультрамикроагрегатов очень мелкого размера с удельным весом, соизмеримым с таковым легких фракций. Следствием этого может быть “загрязнение” легких фракций этим ультрамикротонкодисперсным минеральным материалом.

В отличие от свободного ОВ, углерод ЛФ_{АГР} в гор. CJ-22 криозема р. 1 почти на 70% представлен С_{неорг} (табл. 1), вниз по профилю доля его снижается до 0.3% от С_{ЛФ}^{АГР}. Напротив, углерод в поверхностном гор. CJ-24 петrozема р. 2 почти полностью представлен С_{орг}, доля С_{неорг} составляет < 2% от С_{ЛФ}^{АГР}.

Качественный состав ОВ илистой фракции в почвах данного объекта также характеризуется весьма низкими величинами концентрации С (1.1–3.6% на массу фракции), что, по-видимому, свидетельствует о ярко выраженной микробной природе ОВ в илистой фракции с преобладанием адсорбции микробных остатков (например, клеточных остатков) на минеральную матрицу, наряду с особенностями минералогического состава.

Илистая фракция петрозема р. 2 характеризуется повышенной долей С_{неорг} в составе общего С_{ил} по сравнению с таковой криозема р. 1 (10.4–12.3 против 2.4–4.7% от С_{ил} соответственно) (табл. 1).

Состав ОВ фракции остатка в исследованных почвах двух разрезов достаточно обычен и однотипен: С/N колеблется в пределах 10–16 (рис. 3).

Для фракции остатка в почвах объекта отмечены наиболее высокие доли С_{неорг} в составе общего С_{ост} (10.4–42.2% от С_{ост}) (табл. 1). Аналогично илистой фракции, вклад С_{неорг} в исследованных почвах увеличивается с глубиной.

Ледяная Гавань. Уровень накопления почвенного органического углерода (ПОУ) в верхних горизонтах разрезов данного объекта (карбопетрозем р. 3 и пелоземы pp. 4, 5) увеличивается в следующем ряду: LG-11 < LG-12 < LG-15 (рис. 2). Почвы изучен-

ных разрезов значительно различаются по компонентному составу углерода (табл. 1). В частности, в карбопетроземе (р. 3) отсутствует $\text{ЛФ}_{\text{СВ}}$, и 91% от $C_{\text{опр}}$ почвы представлено фракцией остатка, а на долю ОВ илистой фракции и дискретного ОВ ($\text{ЛФ}_{\text{АГР}}$) приходится только 8 и < 1% от $C_{\text{опр}}$ почвы соответственно. В почвенном профиле пелозема (р. 4) наблюдается аккумулятивный характер распределения $C_{\text{опр}}$: в верхнем горизонте (LG-12) на долю $\text{ЛФ}_{\text{СВ}}$ и $\text{ЛФ}_{\text{АГР}}$ приходится почти 44 и 26% от $C_{\text{опр}}$ почвы соответственно. При этом вклады ОВ илистой фракции и остатка примерно равны и составляют 14 и 17% соответственно. В нижележащем горизонте (LG-13) доля $\text{ЛФ}_{\text{СВ}}$ резко снижается (в 34 раза), а $\text{ЛФ}_{\text{АГР}}$ – в 2.7 раза по сравнению с таковыми в вышележащем гор. LG-12. Следовательно, большая часть $C_{\text{опр}}$ почвы сосредоточена в илистой фракции и остатке (29 и 61% от $C_{\text{опр}}$ почвы соответственно). В гор. LG-14 пелозема (р. 4) отмечено незначительное увеличение доли $\text{ЛФ}_{\text{АГР}}$ в составе $C_{\text{опр}}$ почвы по сравнению с таковой в вышележащем гор. LG-13 (11 против 9% соответственно), что, по-видимому, является проявлением криотурбационных процессов (табл. 1). Это сопровождается уменьшением в гор. LG-14 вклада илистой фракции (в 1.4 раза) и увеличением вклада остатка (в 1.1 раза) по сравнению с таковыми в гор. LG-13. В органопрофиле пелозема (р. 5), на первый взгляд, не наблюдается признаков криотурбации – он имеет выраженный аккумулятивный характер: величина $C_{\text{опр}}$ почвы снижается вниз по профилю (рис. 2). Однако присутствие $\text{ЛФ}_{\text{СВ}}$ на глубине 17–30 см явно свидетельствует об участии криотурбационных процессов в формировании пелозема. В верхнем горизонте (LG-15) пелозема (р. 5) $C_{\text{опр}}$ почвы более чем наполовину (> 64%) представлен $\text{ЛФ}_{\text{СВ}}$, вклад $\text{ЛФ}_{\text{АГР}}$ значительно ниже (11% от $C_{\text{опр}}$ почвы) (табл. 1). На долю ОВ илистой фракции и остатка приходится лишь 10 и 14% от $C_{\text{опр}}$ почвы соответственно. В нижележащем гор. LG-16 вклад $\text{ЛФ}_{\text{АГР}}$ в $C_{\text{опр}}$ почвы снижается в 4 раза, при этом $\text{ЛФ}_{\text{СВ}}$ отсутствует, а доли илистой фракции и остатка увеличиваются в 2 и 5 раз соответственно, по сравнению с таковыми в гор. LG-15. Вниз по профилю в гор. LG-16 на долю $\text{ЛФ}_{\text{СВ}}$ приходится почти 2% от $C_{\text{опр}}$ почвы, вклад ОВ илистой фракции увеличивается до 24%, а остатка – снижается до 74% от $C_{\text{опр}}$ почвы (табл. 1).

Горизонты LG-12 и LG-13 пелозема (р. 4) существенно различаются между собой по качественному составу ЛФ_{СВ}. Величина отношения С/N этой фракции в гор. LG-12 составляет 21 (рис. 3), что, вероятно, связано с особенностями микробной активности. В данном горизонте отмечена максимальная среди всех почв исследованной территории величина микробной биомассы: 390 против 90 мкг/г почвы в горизонтах LG-11–LG-17 (Никитин и др., 2021b). Нижележащий гор. LG-13 явно “загрязнен” минеральным компонентом и характеризуется весьма низкими (для ЛФ_{СВ}) величинами концентрации С_{опр} и N – 15.5 и 0.4% на массу фракции.

Доля С_{неопр} в общем С_{СВ} поверхностных горизонтов (LG-12 и LG-15) пелоземов (пп. 4, 5) выше по сравнению с таковой гор. CJ-22 объекта Мыс Желания в 6–10 раз (табл. 1).

Состав ЛФ_{АГР} в почвах исследованных разрезов данного объекта достаточно обычен и однотипен: С/N колеблется в пределах 15–26 (рис. 3). Единственное исключение отмечено для гор. LG-11, где, аналогично почвам объекта Мыс Желания, ЛФ_{АГР} характеризуется низкими величинами концентрации С и N (7 и 0.3% на массу фракции соответственно), что свидетельствует о значительном присутствии в ее составе ультратонкодисперсного минерального компонента.

Доля С_{неопр} в общем С_{АГР} исследованных почв объекта Ледяная Гавань незначительна – не превышает 2.3% от С_{АГР}. Исключение отмечено лишь для гор. LG-11 криозема р. 3, где вклад С_{неопр} в общий С_{АГР} составил почти 23% (табл. 1). Тем не менее, это более чем в 3 раза ниже по сравнению с таковым в гор. CJ-22 криозема р. 1 объекта Мыс Желания.

Качественный состав ОВ илистой фракции в верхних гор. (LG-12, LG-15) пелоземов (пп. 4, 5 соответственно) характеризуется достаточно высокими величинами С и N (6.2 и 8.1% на массу фракции соответственно) и традиционной для почв Русской равнины величиной отношения С/N (~10) (Артемьева, Федотов, 2013). Остальные почвенные горизонты данного объекта отличаются явной недонасыщенностью по углероду – величины концентрации С_{опр} весьма низкие (1–2.5% на массу фракции). Аналогично почвам объекта Мыс Желания (описанным выше), это может быть следствием преобладания адсорбции микробных остатков (напри-

мер, клеточных остатков) на минеральную матрицу, наряду с особенностями минералогического состава.

Доля $C_{неопр}$ в общем $C_{ил}$ в исследованных почвах данного объекта колеблется в широких пределах: 3.6–6.4% от $C_{ил}$ в верхних горизонтах (LG-12, LG-15), увеличиваясь с глубиной до 14.8–16.3% от $C_{ил}$ (табл. 1). Исключение отмечено лишь для верхнего гор. LG-11 карбопетrozема р. 3, где $C_{ил}$ почти наполовину состоит из $C_{неопр}$ (46% от $C_{ил}$).

Состав ОВ фракции остатка в изученных почвах существенно различается: С/N колеблется в широких пределах от 19 до 27 (рис. 3). Это может быть следствием очень прочной связи остатков моховой растительности с первичными минералами, которые при физическом фракционировании почвы попадают во фракцию остатка. Кроме того, это может быть следствием очень низкой концентрации N в данной фракции (0.02–0.03% на массу фракции) и возникающими при этом аналитическими ошибками, значительно влияющими на величину отношения С/N.

Характерной чертой $C_{ост}$ в исследованных почвах объекта Ледяная Гавань является преобладание в его составе $C_{неопр}$: 50.2–73.7% от $C_{ост}$ (табл. 1). Исключение наблюдается лишь в гор. LG-17 пелозема р. 5, где вклад $C_{неопр}$ составляет лишь 43.7% от $C_{ост}$.

Таким образом, карбопетрозем р. 3 характеризуется наиболее высокой долей $C_{неопр}$ во всех фракциях ОВ среди исследованных почв данного объекта.

Русская Гавань. Среди изученных почв резко выделяется органогенный горизонт (RG-1) криозема (р. 6) с максимально наблюдаемым на всей исследованной территории уровнем накопления ПОУ (14.6% на массу почвы) и вкладом $\Lambda\Phi_{СВ}$ в $C_{опр}$ (> 90%) (рис. 2). Учитывая органогенный характер верхнего гор. RG-1 (р. 6), на долю илистой фракции и остатка приходится лишь 2.6–2.1% от $C_{опр}$, остальные 4.3% в $C_{опр}$ вносит $\Lambda\Phi_{АГР}$ (рис. 2). В нижележащем горизонте (RG-2) уровень накопления $C_{опр}$ более чем в 5 раз, а вклад $\Lambda\Phi_{СВ}$ в $C_{опр}$ более чем в 9 раз меньше по сравнению с таковыми в гор. (RG-1) (рис. 2); остальные почвы (петрозем р. 7, карбопетрозем р. 8, пелозем р. 9) характеризуются значительно мёньшими величинами уровня накопления $C_{опр}$, как правило, $C_{опр} \leq 1\%$ на массу почвы (рис. 2), а также вкладом $\Lambda\Phi_{СВ}$ в $C_{опр}$ (1–2%).

В горизонтах RG-2, RG-3 (р. 6) вклады фракций ЛФ_{АГР}, илистой и остатка составляют 15–29, 20 и 42–62% от С_{опр} соответственно.

В петроземе (р. 7) вскрыт единственный горизонт RG-4, в котором, несмотря на то, что он классифицирован как смешанный органогенный с породой, практически не наблюдаются признаки органогенного происхождения: подавляющая часть С_{опр} в нем сосредоточена в илистой фракции и остатке (38 и 59% от С_{опр}) и лишь 2.6% в С_{опр} вносит дискретное ОВ (ЛФ_{АГР}) (рис. 2).

Карбопетrozem (р. 8) характеризуется очень незначительным уровнем накопления С_{опр}. Тем не менее, горизонты (RG-5 и RG-6) содержат полный набор дискретного ОВ: вклад ЛФ_{СВ} в С_{опр} составляет < 1%, вклад ЛФ_{АГР} – 3.4–4.8% от С_{опр} соответственно; большая часть С_{опр} сосредоточена в илистой фракции и остатке (~28 и 67–68% от С_{опр}^{общ} соответственно) (рис. 2).

Единственный вскрытый в пелоземе (р. 9) гор. RG-7 идентифицируется, аналогично RG-4, как смешанный органогенный с породой. Тем не менее, анализ состава ОВ свидетельствует о большем участии органогенных продуктов в RG-7, по сравнению с таковым в гор. RG-4: уровень накопления С_{опр} в пелоземе значительно выше (в 2.8 раза) по сравнению с таковым в петроземе (рис. 2). Это сопровождается увеличением вклада ЛФ_{АГР} (в 1.2 раза), снижением вклада илистой фракции в С_{опр} (в 1.3 раза) и увеличением вклада остатка (в 1.2 раза).

Качественный состав дискретного ОВ (ЛФ_{СВ} и ЛФ_{АГР}) в криоземе (р. 6) и карбопетроземе (р. 8) хорошо соотносится с микробиологическими показателями (Никитин и др., 2021b): с увеличением количества биомассы вниз по профилю увеличивается степень его микробной переработки (величина С/N сужается вниз по профилю) (рис. 3).

Дискретное ОВ (ЛФ_{СВ} и ЛФ_{АГР}) в карбопетроземе р. 8 выделяется среди исследованных почв данного объекта по вкладу С_{неопр}: 4.9–29 против 0.2–1.0% от С_{СВ} и 1.2–5.7 против 0.1–0.6% от С_{АГР} (табл. 1).

ОВ илистой фракции в криоземе (р. 6) характеризуется максимально высокими величинами С_{опр} среди всех исследованных объектов: 4.6–9.1% на массу фракции, а также привычной (для почв Русской равнины) величиной отношения С/N (~10) (Федотов,

Артемьева, 2015). Остальные почвы данного объекта (петроземы (пп. 7 и 9) и карбопетrozем (р. 8)) характеризуются недонасыщенностью по углероду – величины концентрации C_{opr} достаточно низкие (1.9–2.8% на массу фракции).

Илистая фракция в карбопетrozеме р. 8, аналогично дискретному ОВ, характеризуется наиболее высоким вкладом C_{neopr} в общий C_{il} : 20.0–25.7 против 1.2–6.5% от C_{il} (табл. 1).

Качественный состав ОВ фракции остатка в почвах данного объекта, аналогично таковым объекта Бухта Благополучия, значительно варьирует: С/N колеблется в широких пределах от 14 до 24 (рис. 3).

Углерод фракции Остаток в карбопетrozеме р. 8 более чем на $\frac{3}{4}$ представлен C_{neopr} (81.5–85.4% от C_{Oct}). Петрозем р. 7 и пелозем р. 9 также характеризуются повышенной долей C_{neopr} в составе общего C_{Oct} (51 и 61% от C_{Oct} соответственно). Углерод фракции Остаток в криоземе р. 6 характеризуется намного меньшим вкладом C_{neopr} в общий C_{Oct} : 11.4–31.1% от C_{Oct} (рис. 2).

Таким образом, карбопетrozем р. 8 объекта Русская Гавань, аналогично карбопетrozему р. 3 объекта Ледяная Гавань, характеризуется наиболее высокой долей C_{neopr} во всех фракциях ОВ среди исследованных почв объекта Русская Гавань.

Бухта Благополучия. Уровень накопления C_{opr} в пелоземе и криоземе (пп. 10 и 11 соответственно) существенно различается: в гор. ВВ-8 (пелозем) он ниже в 1.5 и 2.3 раза по сравнению с таковыми в горизонтах ВВ-9 и ВВ-10 соответственно (криозем) (рис. 2). Таким образом, в формировании криозема (р. 11) очевидно значительное участие криотурбационных процессов и, как следствие, погребение гор. ВВ-10, что подтверждается увеличением величины C_{opr} почвы (в 2.3 раза) по сравнению с таковой выше лежащего гор. ВВ-9 (рис. 2). Это сопровождается аналогичными тенденциями в распределении вкладов разных пулов ОВ в C_{opr} почвы: для дискретного ОВ ($\Lambda\Phi_{СВ}$ и $\Lambda\Phi_{AGR}$) они максимальны в погребенном гор. ВВ-10 криозема (27 и 20% от C_{opr} почвы соответственно) и минимальны в пелоземе (2.4 и 9.5% от C_{opr} почвы соответственно). Распределение вкладов (C_{opr}) илистой фракции и остатка в C_{opr} почвы следуют таковому массы фракций.

Качественный состав $\Lambda\Phi_{СВ}$ в разрезах значительно различа-

ется: величина отношения С/N в этой фракции колеблется от 22 (пелозем) до 33–41 (криозем) (рис. 3). По-видимому, это обусловлено разной природой ОВ в данных почвах. В первом случае единственный вскрытый горизонт (ВВ-8) представлен преимущественно породой (C_{Ca}) с незначительным включением остатков корней и моховой растительности, составляющих ЛФ_{СВ}, на долю которых приходится лишь 2.4% от C_{opr} почвы горизонта. В криоземе (р. 11) с достаточно развитым растительным покровом (*Deschampsia brevifolia*, *Saxifraga hyperborea*, мхи), напротив, ЛФ_{СВ} вносит довольно существенный вклад в C_{opr} почвы: 15–26% от C_{opr} почвы и характеризуется значительно большей степенью микробной переработки, что подтверждается микробиологическими показателями (Никитин и др., 2021b). В частности, общее количество микробной биомассы в гор. ВВ-9 максимальное для почв данного объекта: 211 против 147–175 мкг/г почвы в гор. ВВ-8 и ВВ-10 (Никитин и др., 2021b).

Доля C_{neopr} в составе $C_{LF}^{СВ}$ незначительна (0.1–0.7% от $C_{LF}^{СВ}$) и соизмерим с таковой в гор. СJ-22 объекта Мыс Желания и криоземе р. 6 объекта Русская Гавань (табл. 1).

Для ЛФ_{AGR} в разрезах наблюдаются тенденции, аналогичные таковым для ЛФ_{СВ}: горизонты криозема (ВВ-9 и ВВ-10) отличаются от горизонта ВВ-8 пелозема более широким отношением С/N в анализируемой фракции, свидетельствующим об обеднении азотом в результате более интенсивной микробной переработки (рис. 3). Это сопровождается “загрязнением” ультратонкодисперсным компонентом ЛФ_{AGR} горизонтов ВВ-8 и ВВ-9, что отражается в пониженных величинах концентрации C_{opr} (14.7 и 10.4 на массу фракции соответственно). ЛФ_{AGR} в погребенном гор. ВВ-10 (криозем) обогащена азотом по сравнению с таковой вышележащего гор. ВВ-9 (в 2 раза), что указывает на большую степень его сохранности по сравнению с гор. ВВ-9.

Вклад C_{neopr} в составе C_{LF}^{AGR} незначителен (0.2–4.4% от $C_{LF}^{СВ}$), но выше такового $C_{LF}^{СВ}$.

ОВ илистой фракции в почвах данного объекта характеризуется промежуточными (между таковой фракцией объектов Мыс Желания и Ледяной Гаванью) величинами концентрации С (3.1–5.7% на массу фракции), что отражается в повышенной, по срав-

нению с таковыми для почв Русской равнины, величинами отношения C/N: 10.7–15.3 (рис. 3).

Доля $C_{\text{неопр}}$ в $C_{\text{Ил}}$ колеблется в пределах 14.3–28.6% от $C_{\text{Ил}}$ в верхних горизонтах (ВВ-8 и ВВ-9) и снижается в нижнем горизонте ВВ-10 до 2.9% от $C_{\text{Ил}}$ (табл. 1).

Качественный состав ОВ фракции остатка в почвах данного объекта значительно варьирует: C/N колеблется в широких пределах от 14 до 32 (рис. 3).

Вклад $C_{\text{неопр}}$ в составе $C_{\text{Ост}}$ достаточно высок в верхних горизонтах (ВВ-8 и ВВ-9): 28.8–57.6% от $C_{\text{Ост}}$, в нижнем горизонте ВВ-10 он снижается до 12.2% от $C_{\text{Ост}}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые получены уникальные экспериментальные данные по компонентному составу ОВ о. Северный архипелага Новая Земля. Показано, что широко представленные на этой территории криоземы и петроземы заметно различаются по содержанию и составу ОВ, что, вероятно, свидетельствует о разнообразии экологических условий на сравнительно небольшой территории ($\sim 49 \text{ км}^2$). Криогенные и связанные с ними криотурбационные процессы, наряду с низкими температурами, оказывают доминирующее влияние на формирование и уровень накопления ОВ в этой экстремально суровой по климатическим особенностям зоне исследования.

Несмотря на небольшие величины накопления $C_{\text{опр}}$ (исключая органогенные горизонты), практически во всех почвах наблюдается присутствие обеих форм дискретного ОВ ($\text{ЛФ}_{\text{СВ}}$ и $\text{ЛФ}_{\text{АГР}}$). Вне зависимости от глубины залегания горизонтов во всех почвенных профилях исследованных объектов углерод в дискретном ОВ ($\text{ЛФ}_{\text{СВ}}$ и $\text{ЛФ}_{\text{АГР}}$) на 94–96% (в среднем) представлен органическим углеродом, а в илистой фракции и остатке доля $C_{\text{опр}}$ от $C_{\text{общ}}$ фракции снижается до 87 и 54% соответственно.

Уровень накопления $C_{\text{опр}}$ в различных фракциях во многом определяет микробиологическую активность в почвах о. Северный. Коэффициент корреляции (R^2 , $P < 0.05$) между содержанием $C_{\text{опр}}$ фракций (% на массу почвы) и величиной микробной биомассы снижается в следующем ряду: $\text{ЛФ}_{\text{АГР}} (0.59) > \text{mA} (0.53) > \text{ЛФ}_{\text{СВ}}$

(0.50) > ил (0.36) > остаток (0.26), отражая важную роль структурных единиц почвы, в частности, неустойчивых в УЗ-поле микроагрегатов (мА), в обеспечении благоприятных экологических условий для функционирования микробиоты.

Свободное ОВ (ЛФ_{СВ}), как правило, представлено слабо трансформированным детритом, что отражает неблагоприятные экологические условия для разложения ОВ.

Агрегированное ОВ (ЛФ_{АГР}) в изученных почвах всегда “загрязнено” ультратонкодисперсным минеральным компонентом, что, вероятно, является следствием интенсивных криогенных процессов.

Илистые фракции почв часто недонасыщены по углероду: величины концентрации С_{орг} очень низкие (1–2% на массу фракции), что, по-видимому, обусловлено недостатком дискретного ОВ в экстремально суровых климатических условиях, наряду с возможными специфическими особенностями их минералогического состава.

ОВ фракции остатка в изученных почвах характеризуется широким диапазоном величины отношения С/N (от 10 до 32). Причиной этого, с одной стороны, может быть очень прочная связь остатков моховой растительности с первичными минералами (устойчивых в УЗ-поле микроагрегатов), которые при физическом фракционировании почвы могут попадать во фракцию остатка. С другой стороны, в силу очень низкой концентрации N в данной фракции нельзя исключать высокую вероятность появления существенных аналитических ошибок при его определении, что приводит к значительной величине варьирования отношения С/N.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ананко Т.В., Герасимова М.И., Конюшков Д.Е. Арктические и тундровые почвы на новой цифровой почвенной карте России масштаба 1 : 2.5 млн // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2020. Вып. 101. С. 46–75. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-101-46-75>.
2. Артемьевая З.С., Федотов Г.Н. Состав функциональных пулов легкоразлагаемого органического вещества автоморфных зонального ряда почв Центра Русской равнины // Вестник Московского

- университета. Серия 17. Почвоведение. 2013. № 4. С. 3–10.
3. Артемьева З.С., Юртаев А.А., Александровский А.Л., Зазовская Э.П. Органическое вещество погребенной торфяной почвы на острове Белый (Карское море) // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2016. Вып. 85. С. 36–55. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2016-85-36-56>.
4. Горячин С.В., Караваева Н.А., Таргульян В.О. География почв Арктики: современные проблемы // Почвоведение. 1998. № 5. С. 520–530.
5. Грищенко И.В. Климат / Новая Земля. М.: Европейские издания – Paulsen, 2009. С. 307–311.
6. Классификация и диагностика почв СССР. М.: Колос, 1977. 223 с.
7. Кононова М.М. Органическое вещество почвы, его природа, свойства и методы изучения. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 315 с.
8. Крупская В.В., Мирошников А.Ю., Доржсиева О.В., Закусин С.В., Семенков И.Н., Усачева А.А. Минеральный состав почв и донных осадков заливов архипелага Новая Земля // Океанология. 2017. № 57(1). С. 238–245.
9. Мирошников А.Ю., Лаверов Н.П., Чернов Р.А., Кудиков А.В., Усачева А.А., Семенков И.Н., Алиев Р.А., Асадулин Эн Э., Гаврило М.В. Радиоэкологические исследования на севере архипелага Новая Земля // Океанология. 2017. Т. 57. № 1. С. 227–237.
10. Мосеев Д.С., Сергиенко Л.А. К флоре островов архипелага Земля Франца-Иосифа и северной части архипелага Новая Земля (аннотированный список видов) // Ученые записки Петрозаводского гос. ун-та. 2017. № 4. 165 с.
11. Никитин Д.А., Лысак Л.В., Бадмадашиев Д.В., Холод С.С., Мергелов Н.С., Долгих А.В., Горячин С.В. Биологическая активность почв севера архипелага Новая Земля: влияние крупнейшего ледника России // Почвоведение. 2021а. Т. 54. № 10. С. 1207–1230.
12. Никитин Д.А., Лысак Л.В., Кутовая О.В., Грачева Т.А. Экологотрофическая структура и таксономическая характеристика сообществ микроорганизмов почв северной части архипелага Новая Земля // Почвоведение. 2021б. № 11. С. 1346–1362. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0032180X21110101>.
13. Орлов Д.С. Гумусовые кислоты почв. М.: Изд-во МГУ, 1974. 333 с.
14. Семенков И.Н. Физико-географическая характеристика архипелага Новая Земля (литературный обзор). 2020. DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.15583.20642>.
15. Тюрин И.В. Органическое вещество почвы и его роль в почвообразовании и плодородии. М-Л.: Сельхозгиз, 1937. 285 с.

16. Федотов Г.Н., Артемьевая З.С. Коллоидная составляющая грануло-денсиметрических фракций почв // Почвоведение. 2015. № 1. С. 61–70. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0032180X15010049>.
17. 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. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105403>.
18. Bockheim J.G., Mazhitova G., Kimble J.M., Tarnocai C. Controversies on the genesis and classification of permafrost-affected soils // Geoderma. 2006. Vol. 137. P. 33–39.
19. Gerzabek M.H., Haberhauer G., Stemmer M., Klepsch S., Haunold E. Long-term behavior of ^{15}N in an alpine grassland ecosystem // Biogeochemistry. 2004. Vol. 70. P. 59–69.
20. Post E., Alley R.B., Christensen T.R., Macias-Fauria M., Forbes B.C., Gooseff M.N. et al. The polar regions in a 2 °C warmer world // Sci. Adv. 2019 Vol. 5. P. 12. DOI: <https://doi.org/10.1126/sciadv.aaw9883>.
21. 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.

REFERENCES

1. Ananko T.V., Gerasimova M.I., Konyushkov D.E., Arctic and tundra soils on the new digital soil map of Russia, 1 : 2.5 M scale, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2020, Vol. 101, pp. 46–75, DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-101-46-75>.
2. Artem'eva Z.S., Fedotov G.N., Sostav funktsional'nykh pulov legkorazlagаемого органического вещества автоморфных зонального ряда почв Центра Русской равнины (Composition of functional pools of easily decomposed organic matter in automorphic zonal soils of the Central Russian Plain), *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 17. Pochvovedenie*, 2013, No. 4, pp. 3–10.
3. Artemyeva Z.S., Yurtaev A.V., Alexandrovskiy A.L., Zazovskaya E.P., The organic matter of the buried peat soils on Bely island (Kara sea), *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2016, Vol. 85, pp. 36–55, DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2016-85-36-56>.
4. Goryachkin S.V., Karavaeva N.A., Targul'yan V.O., Geografiya pochv Arktiki: sovremennye problemy (Soil geography of the Arctic: current problems), *Pochvovedenie*, 1998, No. 5, pp. 520–530.
5. Grishchenko I.V., *Klimat. Novaya Zemlya* (Climate. Novaya Zemlya), Moscow: Evropejskie izdaniya – Paulsen, 2009, pp. 307–311.

6. *Classification and diagnostics of soils of the USSR*, Moscow: Kolos, 1977, 223 p.
7. Kononova M.M., *Organicheskoe veshchestvo pochvy, ego priroda, svojstva i metody izucheniya* (Soil organic matter, its nature, properties, and methods of study), Moscow: Izd-vo AN SSSR, 1963, 315 p.
8. Krupskaya V.V., Miroshnikov A.Yu., Dorzhieva O.V., Zakusin S.V., Semenkov I.N., Usacheva A.A., Mineral'nyj sostav pochv i donnykh osadkov zalivov arkhipelaga Novaya Zemlya (Mineral Composition of Soils and Bottom Sediments in the Bays of the Novaya Zemlya Archipelago), *Okeanologiya*, 2017, Vol. 57, No. 1, pp. 238–245.
9. Miroshnikov A.Yu., Laverov N.P., Chernov R.A., Kudikov A.V., Usacheva A.A., Semenkov I.N., Aliev R.A., Asadulin En E., Gavrilo M.V., Radioekologicheskie issledovaniya na severnye arkhipelaga Novaya Zemlya (Radioecological studies in the north of the Novaya Zemlya archipelago), *Okeanologiya*, 2017, Vol. 57, No. 1, pp. 227–237.
10. Moseev D.S., Sergienko L.A., K flore ostrovov arkhipelaga Zemlya Frantsa-Iosifa i severnoj chasti arkhipelaga Novaya Zemlya (annotirovannyj spisok vidov) (On the flora of the islands of the Franz Josef Land archipelago and the northern part of the Novaya Zemlya archipelago (annotated list of species)), *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gos. un-ta*, 2017, No. 4, 165 p.
11. Nikitin D.A., Lysak L.V., Badmadashiev D.V., Kholod S.S., Mergelov N.S., Dolgikh A.V., Goryachkin S.V., Biologicheskaya aktivnost' pochv severnye arkhipelaga Novaya Zemlya: vliyanie krupnejshego lednika Rossii (Biological activity of soils in the north of the Novaya Zemlya archipelago: the influence of the largest glacier in Russia), *Pochvovedenie*, 2021a, Vol. 54, No. 10, pp. 1207–1230.
12. Nikitin D.A., Lysak L.V., Kutovaya O.V., Gracheva T.A., Ekologotroficheskaya struktura i taksonomicheskaya kharakteristika soobshchestv mikroorganizmov pochv severnoj chasti arkhipelaga Novaya Zemlya (Ecological and trophic structure and taxonomic characteristics of microbial communities in soils of the northern part of the Novaya Zemlya archipelago), *Pochvovedenie*, 2021b, No. 11, pp. 1346–1362, DOI: <https://doi.org/10.31857/S0032180X21110101>.
13. Orlov D.S., *Gumusovye kisloty pochv* (Humus acids of soils), Moscow: Izd-vo MGU, 1974, 333 p.
14. Semenkov I.N., *Fiziko-geograficheskaya kharakteristika arkhipelaga Novaya Zemlya (literaturnyj obzor)* (Physical and geographical characteristics of the Novaya Zemlya archipelago (review)), 2020, DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.15583.20642>.

15. Tyurin I.V., *Organicheskoe veshchestvo pochvy i ego rol' v pochvoobrazovani i plodorodii* (Soil organic matter and its role in soil formation and fertility), Moscow-Leningrad: Sel'khozgiz, 1937, 285 p.
16. Fedotov G.N., Artem'eva Z.S., Kolloidnaya sostavlyayushchaya granulodensimetriceskikh fraktsij pochv (Colloidal component of granulodensimetric fractions of soils), *Pochvovedenie*, 2015, No. 1, pp. 61–70, DOI: <https://doi.org/10.7868/S0032180X15010049>
17. 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, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105403>.
18. Bockheim J.G., Mazhitova G., Kimble J.M., Tarnocai C., Controversies on the genesis and classification of permafrost-affected soils, *Geoderma*, 2006, Vol. 137, pp. 33–39.
19. Gerzabek M.H., Haberhauer G., Stemmer M., Klepsch S., Haunold E., Long-term behavior of ^{15}N in an alpine grassland ecosystem, *Biogeochemistry*, 2004, Vol. 70, pp. 59–69.
20. Post E., Alley R.B., Christensen T.R., Macias-Fauria M., Forbes B.C., Gooseff M.N. et al., The polar regions in a 2 °C warmer world, *Sci. Adv.*, 2019, Vol. 5, pp. 12, DOI: <https://doi.org/10.1126/sciadv.aaw9883>.
21. *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.



Ссылки для цитирования:

Фарходов Ю.Р., Данилин И.В., Белобров В.П., Ермолаев Н.Р., Юдин С.А., Надуткин И.А., Страйкова М.Н., Хаматнуров Ш.А., Лазарев В.И., Холодов В.А. Химическое строение органического вещества черноземов типичных при различных технологиях земледелия // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2025. Вып. 125. С. 244-273. DOI: 10.19047/0136-1694-2025-125-244-273

Cite this article as:

Farkhodov Yu.R., Danilin I.V., Belobrov V.P., Ermolaev N.R., Yudin S.A., Stoikova M.N., Hamatnurov Sh. A., Ilyin B.S., Lazarev V.I., Kholodov V.A., The chemical structure of the organic matter of typical chernozems of various farming technologies, Dokuchaev Soil Bulletin, 2025, V. 125, pp. 244-273, DOI: 10.19047/0136-1694-2025-125-244-273

Благодарность:

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда, проект No 24-26-00293, <https://www.rscf.ru/project/24-26-00293>.

Acknowledgments:

The study was supported by the Russian Science Foundation, project No. 24-26-00293, <https://www.rscf.ru/project/24-26-00293>.

Химическое строение органического вещества черноземов типичных при различных технологиях земледелия

© 2025 г. Ю. Р. Фарходов^{1*}, И. В. Данилин¹, В. П. Белобров¹,
Н. Р. Ермолаев¹, С. А. Юдин¹, И. А. Надуткин¹,
Ш. А. Хаматнуров¹, М. Н. Страйкова¹, В. И. Лазарев^{2**},
В. А. Холодов¹

¹ФИЦ “Почвенный институт им. В.В. Докучаева”, Россия,
119017, Москва, Пыжевский пер, 7, стр. 2,
^{*}<https://orcid.org/0000-0002-0210-380X>,
e-mail: yulian.farkhodov@yandex.ru.

²Курский Федеральный аграрный научный центр, Россия,
305021, Курск, ул. Карла Маркса, 70Б,

^{**}<https://orcid.org/0000-0002-2931-8560>, e-mail: vla190353@yandex.ru.

*Поступила в редакцию 17.06.2024, после доработки 17.07.2025,
принята к публикации 16.09.2025*

Резюме: Экологизация современного земледелия предполагает отказ от технологии традиционной обработки (ТО) и замену ее почвооберегающей. Одной из таких технологий является прямой посев (ПП). Его внедрение существенно изменяет условия поступления и трансформации растительных остатков. При этом мало известно об изменении строения почвенного органического вещества (ПОВ) в условиях применения ПП. Целью работы была сравнительная оценка влияния ПП и ТО на химическое строение органического вещества типичных черноземов. На примере 8-летнего полевого опыта на черноземе типичном (Курская область) проведена оценка влияния технологий ТО и ПП в слоях 0–10 и 10–20 см на химические свойства: pH, содержание подвижных форм фосфора и калия, общего азота, органического углерода, а также химическое строение ПОВ черноземов типичных, для изучения которого применяли методы ИК-спектрометрии и аналитического пиролиза. Строение ПОВ продемонстрировало наиболее выраженную зависимость от технологии земледелия по сравнению с другими изученными свойствами. Трансформация ПОВ в условиях ПП вызвана накоплением углеводов, а также продуктов их микробной переработки. Применение ТО приводит к доминированию в структуре ПОВ компонентов пассивного пула, не участвующих в процессах микробной трансформации. По результатам корреляционного анализа показано, что тенденция к накоплению органического углерода при ПП связана с увеличением доли углеводов и фенольных соединений в составе ПОВ.

Ключевые слова: прямой посев; почвенное органическое вещество; ИК-спектрометрия; аналитический пиролиз; метод главных компонент.

The chemical structure of the organic matter of typical chernozems of various farming technologies

© 2025 Yu. R. Farkhodov^{1*}, I. V. Danilin¹, V. P. Belobrov¹,
N. R. Ermolaev¹, S. A. Yudin¹, I. A. Nadutkin¹,
Sh. A. Hamatnurov¹, M. N. Stroykova¹, V. I. Lazarev^{2***},
V. A. Kholodov¹

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

*<https://orcid.org/0000-0002-0210-380X>,
e-mail: yulian.farkhodov@yandex.ru.

²*Federal Agricultural Kursk Research Center, Russia,
70Б Karl Marx Str., Kursk 305021, Russian Federation,*

**<https://orcid.org/0000-0002-2931-8560>, e-mail: vla190353@yandex.ru.

Received 17.06.2024, Revised 17.07.2025, Accepted 16.09.2025

Abstract: The transition to sustainable agriculture involves the adoption of soil-saving technologies, such as no-till (NT), as an alternative to conventional tillage (CT). The introduction of NT fundamentally alters the dynamics of plant residue input and decomposition; however, its effects on the molecular composition of soil organic matter (SOM) remain insufficiently studied. This study aimed to conduct a comparative assessment of the influence of NT and CT on the chemical structure of SOM in typical chernozems. Soil samples were collected from 0–10 cm and 10–20 cm depths in the 8-year field experiment with a four-course grain crop rotation under NT and CT management. Standard soil chemical properties (pH, available phosphorus and potassium, total nitrogen, and organic carbon) were analyzed. The chemical structure of SOM was characterized using Fourier-transform infrared (FTIR) spectroscopy and analytical pyrolysis. The molecular structure of SOM demonstrated the most pronounced dependence on the tillage practice compared to all other measured properties. The transformation under NT was characterized by the accumulation of carbohydrates and products of their microbial metabolism. In contrast, CT led to the dominance of recalcitrant compounds within the passive pool, which are not involved in active microbial transformation. Correlation analysis revealed that the trends of accumulation of organic carbon under NT is associated with the increased contribution of carbohydrates and phenolic compounds to the SOM composition.

Keywords: no-till; soil organic matter; IR spectrometry; analytical pyrolysis; principal component analysis.

ВВЕДЕНИЕ

Земледелие России основано на интенсивном и высокоэффективном использовании преимущественно черноземов, которые характеризуются высоким содержанием органического вещества, накопленным за время формирования почв в голоцене, в условиях степного и лесостепного климатического режима. На черноземах России преимущественно используется традиционная технология обработки почв, имеющая региональное почвенно-климатическое разнообразие в применении системы обработки. В мировую практику

тику земледелия в середине XX в. была внедрена новая технология – прямой посев (ПП), известная за рубежом как no-till, не предусматривающая механическую обработку почвы, при которой все растительные остатки после сбора урожая остаются на ее поверхности, что позволяет снижать водную эрозию и дефляцию, увеличивать запасы почвенного органического вещества (ПОВ) (Дридигер и др., 2020; Иванов, 2021).

Применение различных агротехнологий приводит к изменениям содержания пуллов ОВ черноземов, среди которых существенное влияние оказывают технологии обработки почвы (Иванов и др., 2019; Иванов и др., 2021; Холодов, Ярославцева, 2021). Технология обработки почвы регулирует процесс разложения растительных остатков, поступающих в почву, влияя на трансформацию ПОВ в целом. Применение прямого посева усиливает процессы накопления ПОВ, а традиционная обработка (ТО) приводит к его интенсивной минерализации (Дридигер и др., 2020; Kan et al., 2022). Влияние обработки почвы может отражаться не только на содержании ПОВ, но и на его строении. Показано что в условиях применения ПП, по сравнению с традиционной технологией земледелия, увеличивается содержание гидрофобных компонентов ПОВ (Šimon et al., 2009), возрастает доля дискретного свободного и внутриагрегатного ПОВ (Vieira et al., 2007; Spargo et al., 2012; Plaza et al., 2013), молекулярный состав которого обогащен фенольными и ароматическими структурами, делая ПОВ более термически и биохимически устойчивым (Ndzelu et al., 2023).

Таким образом, одним из ведущих факторов деградации агрочерноземов выступает механическая обработка почвы – постоянный во времени и пространстве элемент традиционной технологии земледелия, под который создано множество почвообрабатывающих устройств, сеющих и уборочных механизмов. Воздействие на черноземы этих орудий традиционного земледелия с применением технологии прямого посева прекратилось: почва круглый год находится под покровом живой растительности и/или разлагающихся пожнивных остатков (Кирюшин и др., 2019). Применение ПП в черноземах выполняет также долгосрочную программу восстановления деградированных свойств, в том числе связанную с химическим строением ОВ. Строение ПОВ определя-

ет его биодоступность, регулирует численность и структуру микробного сообщества, влияет на агрофизические свойства почвы (Weil, Magdoff, 2004; Murphy et al., 2011). Оценка строения ПОВ крайне необходима для понимания механизмов стабилизации углерода и прогнозирования процессов трансформации в условиях различного землепользования (Холодов и др., 2023). На данный момент времени эта проблема разработана недостаточно, поскольку основное внимание сосредоточено на балансе ОВ.

В качестве объекта для исследований выбран чернозем типичный, формирующийся на мощных лёссовидных покровных отложениях Среднерусской возвышенности, репрезентативный по свойствам и в отношении применяемого зернового севооборота. На примере 8-летнего полевого опыта изучены основные химические свойства, а также химическое строение ПОВ черноземов при обеих технологиях, применяемых в земледелии региона.

Цель работы – оценить влияние прямого посева и традиционной технологии земледелия на химическое строение ОВ черноземов типичных.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объект исследования расположен в Курском районе Курской области (п. Черемушки, N 51°37',53 с.ш.; E 36°15',44 в.д.). В 2013–2016 гг. на базе ФГБНУ “Курский ФНАЦ” был заложен на четырех полях опыт (каждый год последовательно закладывалось по одному полю) с целью изучения минимизации обработок и применения прямого посева. На полях, каждое размером 2.4 га, преобладающим подтипов почв являлись черноземы типичные, встречаемость которых на поле 1 составляла 95.5%, на поле 2 – 70.2%, на поле 3 – 88.2% и на поле 4 – 74.0% (рис. 1, схема опыта на поле 2) (Белобров и др., 2021).

Схема опыта включала 4 варианта, каждый размером 60×100 м: традиционную обработку (далее ТО) – вспашку с оборотом пласта на глубину 20 см, комбинированную обработку (дискование + чизель) на глубину 20 см, минимальную поверхностную обработку (дискование) до 8 см, а также прямой посев (далее ПП), в котором обработка почв не применяется. В рамках заложенного опыта использовался 4-польный севооборот: озимая

пшеница – кукуруза – ячмень – горох. В варианте ПП почвопокровные культуры не применяли. Удобрения и пестициды вносили в соответствии с рекомендациями для каждой культуры фоном по всем вариантам опыта. При применении технологии ПП использовали специализированную сеялку “Дон 114” (3.6 м). В 2022 г., после окончания второй ротации, т. е. через 8 лет, на поле 2 были отобраны образцы на наиболее контрастных вариантах опыта – ПП и ТО в 5-кратной повторности (рис. 1) с двух глубин – 0–10 см и 10–20 см – почвенным буром с буровым стаканом длиной 20 см и диаметром 5 см.

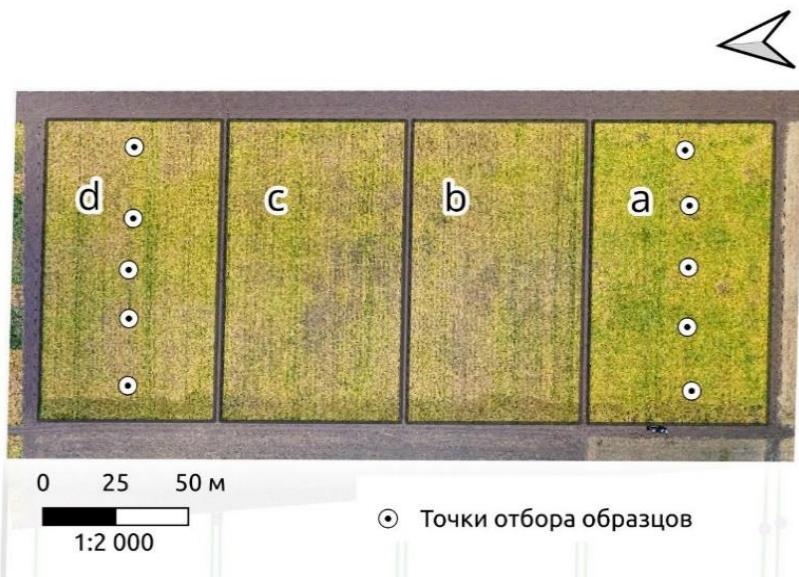


Рис. 1. Ортофотоплан объекта исследования. Буквами обозначены технологии: **a** – прямой посев, **b** – минимальная обработка, **c** – комбинированная обработка, **d** – традиционная обработка.

Fig. 1. Orthophotoplan of the object of study. The letters indicate the technologies: **a** – no-till, **b** – minimal tillage, **c** – combined tillage, **d** – traditional tillage.

В ходе работы изучали показатели кислотности почвы, содержание подвижных форм фосфора и калия, общего азота ($N_{общ}$), органического углерода ($C_{опр}$), а также химическое строение ПОВ методами ИК-спектрометрии и аналитического пиролиза.

Актуальную и обменную кислотность почвы оценивали в водной и солевой вытяжках (1M р-р KCl) методом прямой потенциометрии в соответствии с межгосударственными стандартами (ГОСТ 26483-85, 1986; ГОСТ 26423-85, 1986).

Определение подвижных соединений фосфора и калия проводили по методу Мачигина в модификации ЦИНАО (ГОСТ 26205-91, 1993).

Содержание $C_{опр}$, $N_{общ}$ определяли методом каталитического окисления в токе кислорода при температуре +960 °C на элементном анализаторе vario-MACRO cube (Elementar, Германия) (ISO, 1995). Значения актуальной кислотности (рН_{H2O}) всех образцов были < 7, реакция на содержание карбонатов отрицательная, поэтому весь определенный углерод был отнесен к органическому (Пансю, Готеру, 2014).

Анализ методом инфракрасной спектрометрии в режиме диффузного отражения (DRIFTS) проводили на приборе FT-801 с приставкой PRIZ (Симэкс, Россия) в диапазоне 550–4 000 см⁻¹. Перед анализом образцы почвы дополнительно нагревали до 105 °C в течение 15 мин. с целью удаления адсорбированной влаги на анализаторе влажности BM-50-1 (BioBase, Китай). Все спектры снимали при разрешении 2 см⁻¹, каждый спектр образца получен путем усреднения 36 сканов. Влияние H₂O и CO₂ минимизировали путем вычитания опорного спектра из спектра образца и автоматической коррекции спектра в области 2 240–2 400 и 663–674 см⁻¹ в ПО ZaIR 3.5 (Симэкс, Россия). Для получения опорного спектра использовали металлическое опорное зеркало, для получения спектров образцов почву помещали в алюминиевую кювету диаметром 12 мм, поверхность выравнивали предметным стеклом. Образцы почвы не разбавляли бромидом калия. Обработку спектров проводили в программной среде R с применением пакетов dplyr (Wickham et al., 2023), gsignal (Van Boxtel et al., 2021). Полученные спектры сглаживали фильтром Савицкого-Голея, разметку полос поглощения проводили по вторым производным. Интенсив-

ности всех полос нормировали на общую сумму интенсивностей, получая относительные интенсивности.

Аналитический пиролиз ПОВ проводили в режиме одностадийного нагрева почвенного образца при температуре 500 °C на пиролизере EGA/PY-3030D (Frontier Laboratories, Япония). Разделение и детектирование продуктов пиролиза проводили методом газовой хроматографии и масс-спектрометрии на газовом хроматографе с масс-спектрометрическим детектором GCMS-QP2010 (Shimadzu, Япония). Температура инжектора составляла 300 °C, для инжекции газовой пробы в хроматографическую колонку применяли режим с делением потока (1 : 5). Для разделения газовой смеси использовали капиллярную хроматографическую колонку GsBP-5MS (Gs-Tek, США) длиной 30 м. Температурный режим хроматографирования заключался в постепенном нагреве термостата от 40 до 300 °C со скоростью 40 °C/мин. и экспозиции при максимальной температуре в течение 3 мин. Для ионизации молекул применяли метод электронного удара при 70 эВ. Детекцию проводили с помощью квадрупольного масс-фильтра в диапазоне 45–600 m/z. Деконволюцию пирограмм осуществляли на платформе веб-сервиса GNPS (Global Natural Products Social Molecular Networking) (Aksenov et al., 2021), идентификацию пиков – в программе MS Search (версия 2.0, FairCom Co., США) с помощью библиотеки масс-спектров NIST11 (National Institute of Standards and Technology, США). Для полукаличественной оценки содержания пиролизатов применяли метод внутренней нормализации (De la Rosa et al., 2008).

Статистический анализ данных и визуализацию проводили с помощью языка программирования R в среде разработки RStudio с помощью пакетов ggplot2 (Wickham, 2016), factoextra (Kassambara, Mundt, 2022), corrplot (Dago et al., 2019). Для разведочного анализа использовали метод главных компонент, сравнение по группам проводили с помощью двухфакторного дисперсионного анализа, взаимосвязь показателей химического состава почв оценивали методом корреляции Пирсона. Уровень значимости принимали 5%.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Химические свойства черноземов типичных различных тех-

нологий земледелия в опыте после второй ротации представлены в таблице 1. Все изученные черноземы имеют слабокислые величины pH, характеризующие обменную и актуальную кислотности, а также очень высокую степень обеспеченности по подвижному фосфору и низкую на границе со средней обеспеченностью по подвижному калию. Содержание органического углерода и общего азота соответствует значениям, характерным для пахотных черноземов региона (Фрид и др., 2010).

В результате 8-летнего применения технологий изменился ряд показателей, характеризующих основные свойства черноземов при ТО и ПП. Прежде всего это сказывается на варьировании свойств почв. В ПП на обеих глубинах (0–10 и 10–20 см) отмечается более низкий показатель стандартного отклонения по сравнению с традиционной технологией, что характеризует их устойчивость в пространстве. Этот показатель косвенно указывает на отсутствие обработок в ПП. Кроме того, в ПП на глубине 10–20 см незначительно снизился pH (H_2O) на две десятых, что может указывать на изменения водного режима в поверхностном слое гумусового горизонта, в котором снижается вертикальная фильтрация влаги, а форма агрегатов приобретает субгоризонтальную ориентацию (Юдин и др., 2023). Заметна отчетливая тенденция увеличения содержания C_{org} при ПП, по сравнению с ТО, на обеих глубинах.

Для изучения строения ПОВ проведена оценка интенсивности 15 полос поглощения, преимущественно характеризующих ПОВ (табл. 2). На рисунке 2 показано расположение черноземов в координатах первых двух главных компонент в зависимости от относительной интенсивности полос поглощения в диапазоне ИК-излучения. В совокупности первые две главные компоненты (ГК) практически полностью (92.8%) описывают дисперсию данных, при этом около 83% дисперсии описывает ГК1. Хорошо выраженной кластеризации типичных черноземов в зависимости от технологии обработки почвы и глубины пробоотбора не выявлено. При этом заметно, что практически все точки, характеризующие варианты ПП и ТО на глубине 0–10 см, расположены в разных частях ГК1: точки, характеризующие ПП, – в положительной области, а ТО – в отрицательной.

Таблица 1. Химические свойства черноземов*

Table 1. Chemical properties of chernozems*

Вариант	Глубина, см	pH _{KCl}	pH _{H2O}	P, мг/кг	K, мг/кг	C _{опр} , %	N _{общ} , %
ПП	0–10	5.4 ± 0.3	6.5 ± 0.3	73 ± 9	128 ± 3	2.79 ± 0.13	0.252 ± 0.009
ТО		5.4 ± 0.7	6.6 ± 0.7	92 ± 18	199 ± 93	2.68 ± 0.20	0.239 ± 0.008
ПП	10–20	5.36 ± 0.22	6.3 ± 0.4	99 ± 9	213 ± 17	3.03 ± 0.09	0.258 ± 0.008
ТО		5.4 ± 0.7	6.5 ± 0.6	88 ± 14	247 ± 98	2.9 ± 0.3	0.257 ± 0.027

Примечание. */n = 5, среднее значение ± стандартное отклонение.

Note. */n = 5, mean value ± standard deviation.

Таблица 2. Характеристика полос поглощения спектров DRIFT чернозема типичных вариантов ТО и ПП (Margenot и др., 2015; Volkov и др., 2021).

Table 2. Characteristics of absorption bands of DRIFT chernozem spectra of typical variants of CT and NT

Полоса, см^{-1}	Неорганические компоненты	Органические компоненты
1 064	Кварц, алюмосиликаты (Al-O, Si-O)	Валентные колебания C-O-C фенолов и простых эфиров, валентные колебания C-OH полисахаридов
1 095	Кварц, алюмосиликаты (Si-O), P-O	C-O-C фенолов и простых эфиров, валентные колебания C-OH полисахаридов
1 191	Аморфный кремнезём, составная полоса SiO_2	Валентные колебания C-O-C спиртов, простых эфиров и фенолов, валентные колебания OH, деформационные колебания CH_2
1 277	Составная полоса SiO_2	Валентные колебания C-O карбоксильных кислот, фенолов, простых эфиров, валентные колебания C-N, деформационные колебания CH_2
1 343	–	Валентные колебания C-O простых эфиров, деформационные колебания CH_2
1 419	Mg-OH	Валентные колебания C-O фенолов, деформационные колебания OH
1 546	Составная полоса SiO_2	Валентные колебания C=C ароматических молекул
1 574	–	Деформационные колебания C-H ароматических молекул

Продолжение таблицы 2

Table 2 continued

Полоса, см⁻¹	Неорганические компоненты	Органические компоненты
1 615	H ₂ O, обертон SiO ₂	Валентные колебания C=C ароматических молекул, валентные колебания C-O карбоксилов, валентные колебания C=O кетонов, деформационные колебания N-H
1 645	H ₂ O	Валентные колебания C=O кетонов, амидов, валентные колебания C=C ароматических молекул
1 732	–	Валентные колебания C=O карбонилов
1 790	Составная полоса SiO ₂	Валентные колебания C=O
1 815	–	Валентные колебания C=O
2 876	–	Валентные колебания C-H алифатических соединений
2 962	Обертон SiO ₂	Валентные колебания C-H алифатических соединений

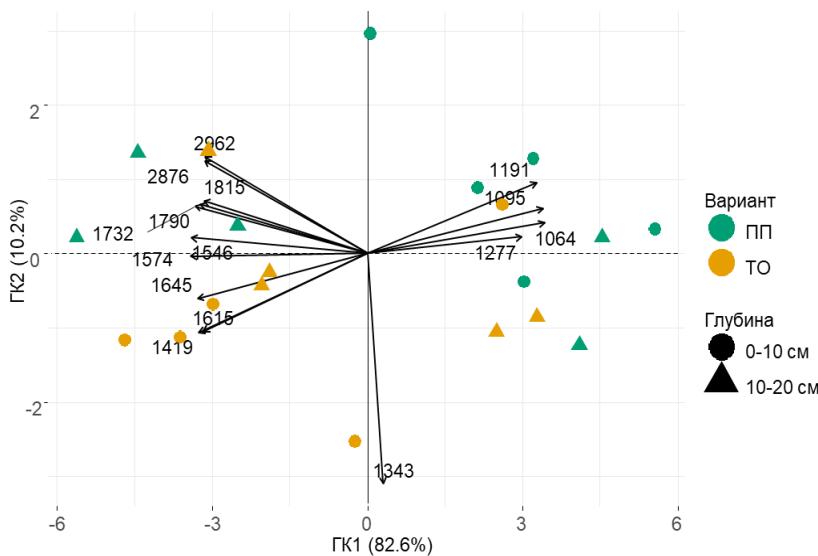


Рис. 2. Расположение точек, характеризующих объекты исследования, на плоскости первых двух главных компонент в зависимости от интенсивности полос поглощения спектров DRIFT.

Fig. 2. Principal component analysis (PCA) ordination based on relative intensities of the absorption bands of the DRIFT spectra, showing significantly different chemical structure of the SOM of chernozems under various cultivation technologies.

По аналогичной закономерности точки (без разделения по глубине пробоотбора) расположены относительно ГК2. Таким образом, точки ПП тяготеют к 1-му квадранту, а ТО – к 3-му квадранту (рис. 2).

Глубина пробоотбора не оказала значимого влияния на относительную интенсивность полос поглощения. Значимое влияние технологии обработки почвы выявлено только для полосы 1343 cm^{-1} (увеличивается в ТО), связанной с валентными колебаниями С-О простых эфиров и деформационными колебаниями CH_2 (табл. 2).

Группа точек, соответствующих варианту ПП, дискримины-

руется от остальных по относительной интенсивности полос 1 064–1 277 cm^{-1} , соответствующих валентным колебаниям фенолов, простых эфиров, азотсодержащих соединений и полисахаридов. Поскольку черноземы вариантов ТО и ПП принадлежат одному подтипу и варьирование их свойств невелико (табл. 1), то выявленную закономерность можно объяснить именно различиями в технологии обработки.

Группа точек, соответствующих варианту ТО, дискриминируется от остальных по относительной интенсивности полос 1 574–1 615 cm^{-1} , соответствующих устойчивым к микробной деструкции карбонильным, карбоксильным и ароматическим соединениям. Накопление этих компонентов ПОВ в варианте ТО относительно варианта ПП может свидетельствовать также о более активной минерализации ПОВ при ТО (Šimon et al., 2009) вследствие разрушения почвенных агрегатов и увеличения площади поверхности контакта с атмосферным воздухом и солнечной радиацией. Таким образом, для варианта ПП наблюдается накопление компонентов ПОВ предположительно растительного происхождения, что позволяет сделать вывод о возможности применения ПП для реализации ресурсосберегающих агротехнологий, в то время как ТО приводит к более интенсивной деградации ПОВ.

Результаты на основе данных по ИК-спектрометрии имеют определенные ограничения. Отсутствие значимых различий в интенсивности полос поглощения (за исключением 1 343 cm^{-1}) может быть связано с мешающим влиянием минеральной матрицы почвы, особенно в области 1 000–1 200 cm^{-1} . С этим же может быть связан значительный разброс точек на пространстве ГК (рис. 2). В настоящее время предложены методы уменьшения ее влияния за счет удаления ПОВ прокаливанием и последующим вычитанием спектра прокаленной почвы из спектра исходной почвы, или растворения минеральной матрицы раствором HF. Однако эти процедуры могут приводить к значительному искажению спектров и усложнению интерпретации полученных результатов. В связи с этим данные ИК-спектрометрии следует дополнять результатами других методов анализа ПОВ.

По результатам аналитического пиролиза черноземов типичных было идентифицировано 33 пиролизата, относящихся к

алифатическим, ароматическим углеводородам (УВ), а также гетероатомным соединениям. На рисунке 3 показано расположение объектов исследования в координатах первых двух главных компонент в зависимости от состава пиролизатов ПОВ. На рисунке видна тенденция к кластеризации черноземов в зависимости от технологии обработки почвы. Заметно, что пиролизаты ПОВ варианта ТО в основном состоят из ароматических УВ, а пиролизаты ПОВ ПП – из кислородсодержащих гетероциклов (фурфурол и метилбензофуран).

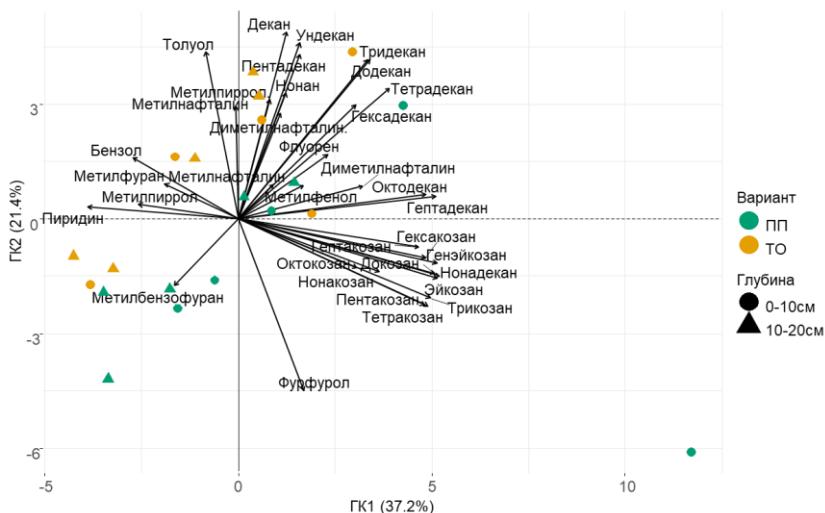


Рис. 3. Расположение точек, характеризующих объекты исследования, на плоскости первых двух главных компонент в зависимости от состава пиролизатов ПОВ.

Fig. 3. Principal component analysis (PCA) ordination based on relative abundances of SOM pyrolysates showing significantly different chemical structure of the SOM of chernozems under various cultivation technologies.

Для детальной интерпретации результатов аналитического пиролиза ПОВ его продукты были разделены на группы по химическому строению и происхождению: азотсодержащие соединения, полициклические ароматические УВ (ПАУ), моноцикличес-

ские ароматические УВ (МАУ), алканы, фенолы, фураны. На рисунке 4 показано относительное содержание выделенных групп пиролизатов ПОВ в зависимости от технологии обработки и глубины пробоотбора. По результатам двухфакторного дисперсионного анализа показано влияние глубины пробоотбора на содержание азотсодержащих соединений в составе пиролизатов ПОВ.

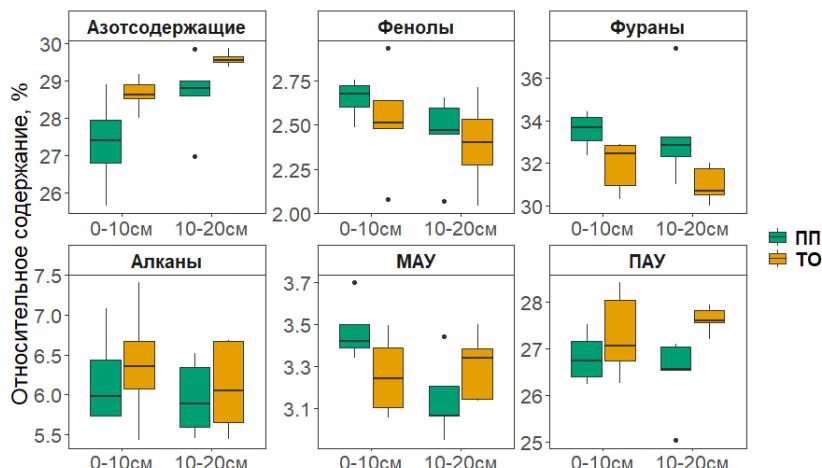


Рис. 4. Относительное содержание пиролизатов ПОВ.

Fig. 4. Relative abundance of SOM pyrolysates.

Технология обработки влияет на относительное содержание азотсодержащих соединений, фуранов и ПАУ. Обилие азотсодержащих пиролизатов ПОВ в слое 10–20 см независимо от технологии обработки почвы вызвано накоплением сильно трансформированных компонентов микробного происхождения, а также обеднением “свежим” ОВ растительного происхождения по сравнению с поверхностным слоем почвы (Wynn et al., 2006). Высокое обилие азотсодержащих компонентов ПОВ в варианте ТО, вероятно, обусловлено интенсивной минерализацией растительных остатков, поступающих в почву, в результате чего растет доля стабильных компонентов ПОВ микробного происхождения. С точки зрения формирования ПОВ, высокое обилие ароматических УВ может

свидетельствовать о наличии высококонденсированных молекул, например, блэк карбон (Rumpel et al., 2007). Также не стоит исключать тот факт, что ароматические УВ образуются в результате циклизации и ароматизации алифатических компонентов ПОВ при пиролизе, интенсивность этого процесса будет зависеть от условий пиролиза и состава ПОВ образца (Moldoveanu, 2019). Высокое обилие ПАУ в составе пиролизатов ПОВ характерно для варианта ТО. Такая закономерность может свидетельствовать о накоплении компонентов пассивного пула ОВ, не участвующих в трансформации ОВ, в условиях интенсивной минерализации ОВ при ТО (Холодов и др., 2020).

Высокое относительное содержание фуранов в варианте ПП, по сравнению с ТО, скорее всего, связано с накоплением продуктов микробной трансформации ПОВ (Saiz-Jimenez, De Leeuw, 1986; Huang et al., 1998), в частности углеводов, основными пиролизатами которых являются фураны (Collard, Blin, 2014; Zhao et al., 2017). В пользу этой интерпретации может указывать то, что применение технологии ПП создает благоприятные условия питания и увлажнения для высокой физиологической активности микроорганизмов (Blevins et al., 1971; Aziz et al., 2013). Группа фенолов была представлена одним соединением – метилфенолом; доля этого пиролизата имеет тенденцию к возрастанию от ТО к ПП, что указывает на накопление полифенолов, а также лигнина – компонентов, активно участвующих в почвенной секвестрации углерода (Blanco-Canqui, Lal, 2004). Относительное содержание МАУ и алканов в составе пиролизатов ПОВ по вариантам опыта и глубине пробоотбора достоверно не различалось.

Таким образом, химическое строение ОВ черноземов типичных по данным аналитического пиролиза указывает на то, что с увеличением глубины пробоотбора растет доля сильно трансформированного ПОВ микробного происхождения. При ТО в черноземах накапливаются компоненты пассивного пула ОВ. Применение ПП на черноземах приводит к накоплению свежего ОВ и продуктов его микробной трансформации.

На рисунке 5 представлена корреляционная матрица, отражающая силу и характер взаимосвязи изученных химических свойств черноземов, а также показателей химического строения

ПОВ по данным ИК-спектрометрии и аналитического пиролиза. В ячейках корреляционной матрицы показаны только значимые коэффициенты корреляции (при $p < 0.05$). Рассчитанные значения коэффициентов корреляции указывают на среднюю силу взаимосвязи изученных переменных. Отсутствие сильных взаимосвязей, близких к функциональным, связано с ограничениями методов химического анализа ПОВ, а также сложностью состава ПОВ. Эти факторы в совокупности обуславливают наличие неоднозначности в интерпретации аналитических данных о его химическом строении.

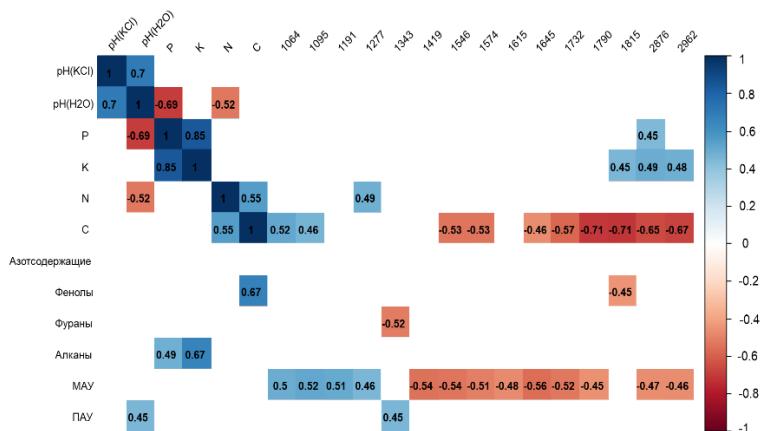


Рис. 5. Термовая корреляционная матрица, характеризующая взаимосвязи изученных химических свойств черноземов типичных.

Fig. 5. The heatmap correlation matrix characterizing the relationships of the studied chemical properties of typical chernozems.

Показано, что содержание подвижных форм фосфора и калия положительно коррелирует с относительной интенсивностью полос поглощения $1815, 2876, 2962 \text{ см}^{-1}$, а также с относительным содержанием алканов среди пиролизатов ПОВ. Такая закономерность, может быть, связана с тем, что доступные формы эле-

ментов питания стимулируют активность микробной биомассы, тем самым усиливают минерализацию ПОВ, в процессе которого происходит накопление алифатических УВ, вероятно, коротко- и среднеподцепочечных жирных кислот, относящихся к почвенным липидам (Розенцвет и др., 2019; Yang et al., 2022). Также это может быть связано с положительным влиянием доступности элементов питания на интенсивность корневой экссудации растений, продукты которой обогащены соединениями алифатического строения (Vives-Peris et al., 2020). Содержание общего азота закономерно коррелирует с относительной интенсивностью полосы $1\,277\text{ cm}^{-1}$, которая связана с валентными колебаниями связи C-N. Корреляционной зависимости $N_{\text{общ}}$ с относительным содержанием азотсодержащих пиролизатов ПОВ не выявлено. Содержание $C_{\text{орг}}$ положительно коррелирует с относительными интенсивностями полос поглощения $1\,064$, $1\,095\text{ cm}^{-1}$, а также обратно зависит от относительных интенсивностей изученных полос поглощения в диапазоне $1\,546$ – $2\,962\text{ cm}^{-1}$ за исключением полосы $1\,615\text{ cm}^{-1}$. Это может свидетельствовать о том, что накопление органического углерода в почве сопровождается увеличением доли углеводов в почве, в то время как его потеря – увеличением доли окисленных (карбоксильные, карбонильные) и ароматических соединений ПОВ. Увеличение доли других алифатических соединений (полосы $2\,850$ – $2\,950\text{ cm}^{-1}$) может быть связано с устойчивостью сорбированных почвенных липидов к минерализации в условиях ТО.

Похожая закономерность наблюдается во взаимосвязи между долей МАУ среди пиролизатов ПОВ и значениями относительных интенсивностей полос поглощения ПОВ. Среди пиролизатов ПОВ только доля фенолов имела устойчивую положительную корреляцию с содержанием органического углерода. На основе этого блока информации мы предполагаем, что формирование МАУ при пиролизе ПОВ частично обусловлено наличием фенольных соединений, а также, что накопление углерода в черноземах происходит за счет увеличения в составе ПОВ фенольных соединений в результате поступления лигнина (Blanco-Canqui, Lal, 2004). Значение относительной интенсивности полосы $1\,343\text{ cm}^{-1}$ отрицательно коррелировало с долей фуранов и положительно коррелировало с долей ПАУ среди пиролизатов ПОВ. Основывая-

ясь на данных аналитического пиролиза, можно предположить, что эта полоса поглощения может характеризовать некоторые компоненты пассивного пула ПОВ. Результаты корреляционного анализа подтверждают обоснованность подхода к разделению ароматических УВ по количеству бензольных ядер: МАУ и ПАУ. Таким образом, корреляционный анализ изученных характеристик ПОВ позволил выявить взаимосвязи содержания некоторых биофильных макроэлементов с химическим строением ПОВ по данным ИК-спектрометрии и аналитического пиролиза, оценить особенности формирования продуктов пиролиза ПОВ и предложить показатели для оперативного мониторинга процессов трансформации ПОВ по данным ИК-спектрометрии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Формирование почвенных свойств при смене условий почвообразования носит накопительный характер, поэтому для доказательных исследований требуется изучение многолетних полевых опытов. В ходе работы по оценке влияния традиционной технологии земледелия и прямого посева на химические свойства типичных черноземов в рамках 8-летнего полевого опыта показано, что наиболее чувствительным показателем трансформации свойств почвы является химическое строение ПОВ. Вне зависимости от применяемой агротехнологии формирование ПОВ на разных глубинах пробоотбора носит различный характер. В строении ОВ черноземов типичных поверхностного слоя (0–10 см) заметен значительный вклад компонентов растительного происхождения и продуктов их трансформации. В подповерхностном слое почвы (10–20 см) возрастает роль компонентов микробного происхождения, а также компонентов, относящихся к пассивному пулу ОВ. Процессы трансформации ПОВ под влиянием ТО и ПП происходят преимущественно в поверхностном слое почвы 0–10 см. Роль агротехнологии в формировании структуры ОВ черноземов связана с различиями в их микробиологической активности. Особенности строения ОВ чернозема в условиях ПП вызваны заметным накоплением углеводов, а также продуктов их микробной трансформации, наблюдается тенденция к накоплению соединений фенольной природы. Применение ТО приводит к доминированию в

структуре ПОВ компонентов пассивного пула, не участвующих в процессах микробной трансформации. Отсутствие значимой разницы в содержании органического углерода между вариантами ПП и ТО, вероятно, связано с тем, что в исследуемом опыте технология ПП не включала применение почвопокровных культур, обеспечивающих дополнительное разнообразие агрокультур в се-вообороте.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александровский А.Л., Александровская Е.И. Эволюция почв и географическая среда. М.: Наука. 2005. 223 с.
2. Белобров В.П., Юдин С.А., Айдиеев А.Я., Ермолаев Н.Р., Лебедева М.П., Абросимов К.Н., Борисочкина Т.И., Воронин А.Я., Плотникова О.О. Чернозем типичный, прямой посев, Курская область. опыт, ротация 1.1 / под ред. А.Л. Иванова. М.: ГЕОС, 2021. 123 с.
3. Дридигер В.К., Иванов А.Л., Белобров В.П., Кутовая О.В. Восстановление свойств почв в технологии прямого посева // Почвоведение. 2020. № 9. С. 1111–1120.
4. Иванов А.Л., Кулинцев В.В., Дридигер В.К., Белобров В.П. О целесообразности освоения системы прямого посева на черноземах России // Достижения науки и техники АПК. 2021. Т. 35. № 4. С. 8–16.
5. Иванов А.Л., Куст Г.С., Донник И.М., Бедрицкий А.И., Багиров В.А., Козлов Д.Н., Савин И.Ю., Алымбаева Ж.Б., Андреев С.Г., Андреева О.В. Глобальный климат и почвенный покров России: опустынивание и деградация земель, институциональные, инфраструктурные, технологические меры адаптации (сельское и лесное хозяйство). Т. 2. М.: ООО “Издательство МБА”, 2019. 476 с.
6. Иванов А.Л., Савин И.Ю., Столбовой В.С., Духанин Ю.А., Козлов Д.Н., Баматов И.М. Глобальный климат и почвенный покров – последствия для землепользования России // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. Москва. 2021. № 107. С. 5–32. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2021-107-5-32>.
7. Кирюшин В.И., Дридигер В.К., Власенко А.Н., Власенко Н.Г., Козлов Д.Н., Кирюшин С.В., Конищев А.А. Методические рекомендации по разработке минимальных систем обработки почвы и прямого посева / М.: ООО “Издательство МБА”, 2019. 136 с.
8. Пансю М., Готеру Ж. Анализ почвы. Справочник. Минералогические, органические и неорганические методы анализа. СПб: ЦОП “Профессия”, 2014. 800 с.

9. Розенцвейт О.А., Федосеева Е.В., Терехова В.А. Липидные биомаркеры в экологической оценке почвенной биоты: анализ жирных кислот // Успехи современной биологии. 2019. Т. 139. № 2. С. 161–177.
10. Столбовой В.С., Гребенников А.М., Оглезнев А.К., Иванов А.Л., Ильин Л.И., Колесникова Л.Г., Петросян Р.Д., Шилов П.М., Филь П.П., Корчагин А.А. Реестр индикаторов качества почв сельскохозяйственных угодий Российской Федерации. Версия 1.0. Иваново: “ПресСто”, 2021. 259 с.
11. Столбовой В.С., Молчанов Э.Н. Единый государственный реестр почвенных ресурсов России как модель пространственной организации почвенного покрова // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2015. № 5. С. 135–143.
12. Фрид А.С. и др. Зонально-провинциальные нормативы изменений агрохимических, физико-химических и физических показателей основных пахотных почв европейской территории России при антропогенных воздействиях. М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 2010. 176 с.
13. Холодов В.А., Рогова О.Б., Лебедева М.П., Варламов Е.Б., Волков Д.С., Зиганишина А.Р., Ярославцева Н.В. Органическое вещество и минеральная матрица почв: современные подходы, определения терминов и методы изучения (обзор) // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2023. № 117. С. 52–100. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2023-117-52-100>.
14. Холодов В.А., Фарходов Ю.Р., Ярославцева Н.В., Айдиеев А.Ю., Лазарев В.И., Ильин Б.С., Иванов А.Л., Куликова Н.А. Термолабильное и термостабильное органическое вещество черноземов разного землепользования // Почвоведение. 2020. Т. 8. С. 970–982.
15. Холодов В.А., Ярославцева Н.В. Агрегаты и органическое вещество почв восстанавливающихся ценозов. М.: ГЕОС, 2021. 119 с.
16. Юдин С.А., Плотникова О.О., Белобров В.П., Лебедева М.П., Абросимов К.Н., Ермолаев Н.Р. Количественная характеристика микростроения типичных черноземов при использовании разных агротехнологий // Почвоведение. 2023. Т. 6. С. 774–786.
17. ГОСТ 26423-85. Методы определения удельной электрической проводимости, pH и плотного остатка водной вытяжки. 1986.
18. ГОСТ 26483-85 Почвы. Приготовление солевой вытяжки и определение ее pH по методу ЦИНАО. 1986.
19. ГОСТ 26205-91 Почвы. Определение подвижных соединений фосфора и калия по методу Мачигина в модификации ЦИНАО. 1993.
20. ГОСТ 26423-85 Почвы. Методы определения удельной электрической проводимости, pH и плотного остатка водной вытяжки. 1986. 7 с.

21. ГОСТ 26483-85 Почвы. Приготовление солевой вытяжки и определение ее pH по методу ЦИНАО. 1986. 7 с.
22. Aksenov A.A. *et al.* Auto-deconvolution and molecular networking of gas chromatography–mass spectrometry data // Nature Biotechnology. 2021. Vol. 39. No 2. P. 169–173.
23. Aziz I., Mahmood T., Islam K.R. Effect of long term no-till and conventional tillage practices on soil quality // Soil and Tillage Research. 2013. Vol. 131. P. 28–35.
24. Blanco-Canqui H., Lal R. Mechanisms of carbon sequestration in soil aggregates // Critical Reviews in Plant Sciences. 2004. Vol. 23. No 6. P. 481–504.
25. Blevins R.L., Cook D., Phillips S.H., Phillips R.E. Influence of No-tillage on Soil Moisture // Agronomy Journal. 1971. Vol. 63. No 4. P. 593–596.
26. Collard F.-X., Blin J. A review on pyrolysis of biomass constituents: Mechanisms and composition of the products obtained from the conversion of cellulose, hemicelluloses and lignin // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2014. Vol. 38. P. 594–608.
27. Dago N.D. *et al.* A Quick Computational Statistical Pipeline Developed in R Programming Environment for Agronomic Metric Data Analysis // 2019. Vol. 9. No 4. P. 22–44.
28. De la Rosa J.M., Gonzalez-Perez J.A., Gonzalez-Vazquez R., Knicker H., Lopez-Capel E., Manning D.A.C., Gonzalez-Vila F.J. Use of pyrolysis / GC-MS combined with thermal analysis to monitor C and N changes in soil organic matter from a Mediterranean fire affected forest // Catena. 2008. Vol. 74. No 3. P. 296–303.
29. Huang Y., Eglinton G., Van der Hage E.R.E., Boon J.J., Bol R., Ineson P. Dissolved organic matter and its parent organic matter in grass upland soil horizons studied by analytical pyrolysis techniques // European Journal of Soil Science. 1998. Vol. 49. No. 1. P. 1–15.
30. ISO. ISO 10694:1995. Soil quality. Determination of organic and total carbon after dry combustion (elementary analysis. 1995.
31. Kan Z.-R., Liu W.-X., Liu W.-S., Lal R., Dang Y.P., Zhao X., Zhang H.-L. Mechanisms of soil organic carbon stability and its response to no-till: A global synthesis and perspective // Global Change Biology. 2022. Vol. 28. No. 3. P. 693–710.
32. Kassambara A., Mundt F. factoextra: Extract and Visualize the Results of Multivariate Data Analyses. 2022. URL: <https://cran.r-project.org/web/packages/factoextra>.
33. Margenot A.J., Calderón F.J., Bowles T.M., Parikh S.J., Jackson L.E. Soil organic matter functional group composition in relation to organic carbon, nitrogen, and phosphorus fractions in organically managed tomato fields //

- Soil Science Society of America Journal. 2015. Vol. 79. No. 3. P. 772–782.
34. Murphy D.V., Cookson W.R., Braimbridge M., Marschner P., Jones D.L., Stockdale E.A., Abbott L.K. Relationships between soil organic matter and the soil microbial biomass (size, functional diversity, and community structure) in crop and pasture systems in a semi-arid environment // Soil Research. 2011. Vol. 49. No. 7. P. 582–594.
35. Ndzelu B.S., Dou S., Zhang X., Zhang Y. Molecular composition and structure of organic matter in density fractions of soils amended with corn straw for five years // Pedosphere. 2023. Vol. 33. No. 2. P. 372–380.
36. Plaza C., Courtier-Murias D., Fernández J.M., Polo A., Simpson A.J. Physical, chemical, and biochemical mechanisms of soil organic matter stabilization under conservation tillage systems: A central role for microbes and microbial by-products in C sequestration // Soil Biology and Biochemistry. 2013. Vol. 57. P. 124–134.
37. Pyrolysis of organic molecules: applications to health and environmental issues / Moldoveanu S.C. (Ed.). Amsterdam: Elsevier Science Bv., 2019. 711 p.
38. Rumpel C., González-Pérez J.A., Bardoux G., Largeau C., Gonzalez-Vila F.J., Valentín C. Composition and reactivity of morphologically distinct charred materials left after slash-and-burn practices in agricultural tropical soils // Organic Geochemistry. 2007. Vol. 38. No. 6. P. 911–920.
39. Saiz-Jimenez C., De Leeuw J.W. Chemical characterization of soil organic matter fractions by analytical pyrolysis-gas chromatography-mass spectrometry // Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. 1986. Vol. 9. No. 2. P. 99–119.
40. Šimon T., Javůrek M., Mikanová O., Vach M. The influence of tillage systems on soil organic matter and soil hydrophobicity // Soil and Tillage Research. 2009. Vol. 105. No. 1. P. 44–48.
41. Spargo J.T., Cavigelli M.A., Alley M.M., Maul J.E., Buyer J.S., Sequeira C.H., Follett R.F. Changes in soil organic carbon and nitrogen fractions with duration of no-tillage management // Soil Science Society of America Journal. 2012. Vol. 76. No. 5. P. 1624–1633.
42. Van Boxtel G., Laboissière R., Wilhelm H.D. gsignal: Signal processing. 2021. URL: <https://github.com/gjmvanboxtel/gsignal>.
43. Vieira F.C.B., Bayer C., Zanatta J.A., Dieckow J., Mielniczuk J., He Z.L. Carbon management index based on physical fractionation of soil organic matter in an Acrisol under long-term no-till cropping systems // Soil and Tillage Research. 2007. Vol. 96. No. 1. P. 195–204.
44. Vives-Peris V., de Ollas C., Gómez-Cadenas A., Pérez-Clemente R.M. Root exudates: from plant to rhizosphere and beyond // Plant Cell Reports. 2020. Vol. 39. No. 1. P. 3–17.

45. Volkov D.S., Rogova O.B., Proskurnin M.A. Organic matter and mineral composition of silicate soils: ftir comparison study by photoacoustic, diffuse reflectance, and attenuated total reflection modalities // Agronomy. 2021. Vol. 11. No. 9. P. 1879.
46. Weil R., Magdoff F. Significance of soil organic matter to soil quality and health // Soil organic matter in sustainable agriculture. 2004. P. 1–43.
47. Wickham H. ggplot2: Elegant graphics for data analysis. New York: Springer-Verlag, 2016.
48. Wickham H., François R., Henry L., Müller K., Vaughan D. dplyr: A grammar of data manipulation. R package version 1.1.4. 2023. URL: <https://github.com/tidyverse/dplyr>.
49. Wynn J.G., Harden J.W., Fries T.L. Stable carbon isotope depth profiles and soil organic carbon dynamics in the lower Mississippi Basin // Geoderma. 2006. Vol. 131. No. 1. P. 89–109.
50. Yang S., Jansen B., Absalah S., Kalbitz K., Chunga Castro F.O., Cammeraat E.L.H. Soil organic carbon content and mineralization controlled by the composition, origin and molecular diversity of organic matter: A study in tropical alpine grasslands // Soil and Tillage Research. 2022. Vol. 215. P. 105203.
51. Zhao C., Jiang E., Chen A. Volatile production from pyrolysis of cellulose, hemicellulose and lignin // Journal of the Energy Institute. 2017. Vol. 90. No. 6. P. 902–913.

REFERENCES

1. Aleksandrovsky A.L., Aleksandrovskaya E.I., *Evolyutsiya pochv i geograficheskaya sreda* (Evolution of soils and geographical environment), Moscow: Nauka, 2005, 223 p.
2. Belobrov V.P., Yudin S.A., Aidiev A.Ya., N.R. E., Lebedeva M.P., Abrosimov K.N., Borisochkina T.I., Voronin A.Ya., Plotnikova O.O., *Chernozem tipichnyy. pryamoy posev, Kurskaya oblast'. opyt, rotatsiya 1.1* (Typical chernozem. No-till, Kursk region. experience, rotation 1.1), A.L. Ivanov (Ed.), Moscow: GEOS, 2021, 123 p.
3. Dridiger V.K., Ivanov A.L., Belobrov V.P., Kutovaya O.V., *Vosstanoveniye svoystv pochv v tekhnologii pryamogo poseva* (Restoration of soil properties in no-till technology), *Soil Science*, 2020, No. 9, pp. 1111–1120.
4. Ivanov A.L., Kulintsev V.V., Dridiger V.K., Belobrov V.P., *O tselesoobraznosti osvoyeniya sistemy pryamogo poseva na chernozemakh Rossii* (On the feasibility of developing a direct sowing system on Russian chernozems), *Achievements of science and technology of the agro-industrial*

complex, 2021, Vol. 35, No. 4, pp. 8–16.

5. Ivanov A.L., Kust G.S., Donnik I.M., Bedritsky A. I., Bagirov V.A., Kozlov D.N., Savin I.Yu., Alymbaeva Zh.B., Andreev S.G., Andreeva O.V., *Global'nyy klimat i pochvennyy pokrov Rossii: opustynivaniye i degradatsiya zemel', institutsional'nyye, infrastruktturnyye, tekhnologicheskiye mery adaptatsii (sel'skoye i lesnoye khozyaystvo)* (Global climate and soil cover in Russia: desertification and land degradation, institutional, infrastructural, technological adaptation measures (agriculture and forestry)), Vol. 2, Moscow: OOO “Izdatelstvo MBA”, 2019, 476 p.
6. Ivanov A.L., Savin I.Yu., Stolbovoy V.S., Dukhanin A.Yu., Kozlov D.N., Bamatov I.M., Global climate and soil cover – implications for land use in Russia, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2021, Vol. 107, pp. 5–32, DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2021-107-5-32>.
7. Kiryushin V.I., Driediger V.K., Vlasenko A.N., Vlasenko N.G., Kozlov D.N., Kiryushin S.V., Konishchev A.A., *Metodicheskiye rekomendatsii po razrabotke minimal'nykh sistem obrabotki pochvy i pryamogo poseva* (Methodological recommendations for the development of minimal tillage systems and no-till), Moscow: : OOO “Izdatelstvo MBA”, 2019, 136 p.
8. Pansyu M., Goterou J., *Analiz pochvy. Spravochnik. Mineralogicheskiye, organicheskiye i neorganicheskiye metody analiza* (Soil analysis. Directory. Mineralogical, organic and inorganic methods of analysis), St. Petersburg: TsOP “Profession”, 2014, 800 p.
9. Rozentsvet O.A., Fedoseeva E.V., Terekhova V.A., Lipednyye biomarkery v ekologicheskoy otsenke pochvennoy bioti: analiz zhirnykh kislot (Lipid biomarkers in the ecological assessment of soil biota: analysis of fatty acids), *Uspekhi sovremennoy biologii Advances in modern biology*, 2019, Vol. 139, No. 2, pp. 161–177.
10. Stolbovoy V.S., Grebennikov A.M., Ogleznev A.K., Ivanov A.L., Ilyin L.I., Kolesnikova L.G., Petrosyan R.D., Shilov P.M., Fil P.P., Korchagin A.A., *Reyestr indikatorov kachestva pochv sel'skokhozyaystvennykh ugodiy Rossiyskoy Federatsii. Versiya 1.0* (Register of indicators of soil quality in agricultural lands of the Russian Federation. Version 1.0), Ivanovo: “PresSto”, 2021, 259 p.
11. Stolbovoy V.S., Molchanov E.N., Yedinyy gosudarstvennyy reyestr pochvennykh resursov Rossii kak model' prostranstvennoy organizatsii pochvennogo pokrova (Unified state register of soil resources of Russia as a model of spatial organization of soil cover), *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Geographical series*, 2015, No. 5, pp. 135–143.
12. Frid A.S. et al., *Zonal'no-provintsial'nyye normativy izmeneniy agrokhimicheskikh, fiziko-khimicheskikh i fizicheskikh pokazateley osnovnykh*

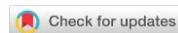
pakhodnykh pochv territorii Rossii pri antropogennykh vozdeystviyakh (Zonal-provincial standards for changes in agrochemical, physicochemical and physical indicators of the main arable soils of the territory of Russia under anthropogenic influences), Moscow: V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, 2010, 176 p.

13. Kholodov V.A., Rogova O.B., Lebedeva M.P., Varlamov E.B., Volkov D.S., Ziganshina A.R., Yaroslavtseva N.V., Organic matter and mineral matrix of soils: modern approaches, definitions of terms and methods of study (review), *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2023, Vol. 117, pp. 52–100, DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2023-117-52-100>.
14. Kholodov V.A., Farkhodov Yu.R., Yaroslavtseva N.V., Aidiev A.Yu., Lazarev V.I., Ilyin B.S., Ivanov A.L., Kulikova N.A., Termolabil'noye i termostabil'noye organicheskoye veshchestvo chernozemov raznogo zemlepol'zovaniya (Thermolabile and thermostable organic matter of chernozems of different land uses), *Pochvovedeniye*, 2020, Vol. 8, pp. 970–982.
15. Kholodov V.A., Yaroslavtseva N.V., *Agregaty i organicheskoye veshchestvo pochv vosstanavlivayushchikhsya tsenozov* (Aggregates and organic matter of soils of recovering cenoses), Moscow: GEOS, 2021, 119 p.
16. Yudin S.A., Plotnikova O.O., Belobrov V.P., Lebedeva M.P., Abrosimov K.N., Ermolaev N.R., *Kolichestvennaya kharakteristika mikrostroyeniya tipichnykh chernozemov pri ispol'zovanii raznykh agrotekhnologiy* (Quantitative characteristics of the microstructure of typical chernozems using different agricultural technologies), *Pochvovedeniye*, 2023, Vol. 6, pp. 774–786.
17. GOST 26423-85, *Metody opredeleniya udel'noy elektricheskoy provodimosti, rN i plotnogo ostatka vodnoy vytyazhki* (Methods for determining specific electrical conductivity, pH and solid residue of aqueous extract), 1986.
18. GOST 26483-85, *Pochvy. Prigotovleniye solevoy vytyazhki i opredeleniye eye pH po metodu TSINAO* (Soils. Preparation of a salt extract and determination of its pH using the TsINAO method), 1986.
19. GOST 26205-91, *Pochvy. Opredeleniye podvizhnykh soyedineniy fosfora i kaliya po metodu Machigina v modifikatsii* (Soils. Determination of mobile compounds of phosphorus and potassium using the Machigin method modified by TsINAO), 1993.
20. GOST 26423-85, *Pochvy. Metody opredeleniya udel'noy elektricheskoy provodimosti, pH i plotnogo ostatka vodnoy vytyazhki* (Soils. Methods for determining specific electrical conductivity, pH and solid residue of aqueous extract), 1986, 7 p.
21. GOST 26483-85, *Pochvy. Prigotovleniye solevoy vytyazhki i opredeleniye*

- уєле pH по методу TSINAO (Soils. Preparation of salt extract and determination of its pH using the TsINAO method), 1986, 7 p.
22. Aksenov A.A. et al., Auto-deconvolution and molecular networking of gas chromatography-mass spectrometry data, *Nature Biotechnology*, 2021, Vol. 39, No. 2, pp. 169–173.
23. Aziz I., Mahmood T., Islam K.R., Effect of long term no-till and conventional tillage practices on soil quality, *Soil and Tillage Research*, 2013, Vol. 131, pp. 28–35.
24. Blanco-Canqui H., Lal R., Mechanisms of carbon sequestration in soil aggregates Critical, *Reviews in Plant Sciences*, 2004, Vol. 23, No. 6, pp. 481–504.
25. Blevins R.L., Cook D., Phillips S.H., Phillips R.E., Influence of no-tillage on soil moisture, *Agronomy Journal*, 1971, Vol. 63, No. 4, pp. 593–596.
26. Collard F.-X., Blin J., A review on pyrolysis of biomass constituents: Mechanisms and composition of the products obtained from the conversion of cellulose, hemicelluloses and lignin, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, Vol. 38, pp. 594–608.
27. Dago N.D. et. al., A quick computational statistical pipeline developed in r programing environment for agronomic metric data analysis, 2019, Vol. 9, No. 4, pp. 22–44.
28. De la Rosa J.M., Gonzalez-Perez J.A., Gonzalez-Vazquez R., Knicker H., Lopez-Capel E., Manning D.A. C., Gonzalez-Vila F.J., Use of pyrolysis/GC-MS combined with thermal analysis to monitor C and N changes in soil organic matter from a Mediterranean fire affected forest, *Catena*, 2008, Vol. 74, No. 3, pp. 296–303.
29. Huang Y., Eglington G., Van der Hage E.R. E., Boon J.J., Bol R., Ineson P., Dissolved organic matter and its parent organic matter in grass upland soil horizons studied by analytical pyrolysis techniques, *European Journal of Soil Science*, 1998, Vol. 49, No. 1, pp. 1–15.
30. ISO. ISO 10694:1995, Soil quality, Determination of organic and total carbon after dry combustion (elementary analysis), 1995.
31. Kan Z.-R., Liu W.-X., Liu W.-S., Lal R., Dang Y.P., Zhao X., Zhang H.-L., Mechanisms of soil organic carbon stability and its response to no-till: A global synthesis and perspective, *Global Change Biology*, 2022, Vol. 28, No. 3, pp. 693–710.
32. Kassambara A., Mundt F., factoextra: Extract and visualize the results of multivariate data analyses, 2022, URL: <https://cran.r-project.org/web/packages/factoextra>.
33. Margenot A.J., Calderón F.J., Bowles T.M., Parikh S.J., Jackson L.E., Soil organic matter functional group composition in relation to organic carbon, nitrogen, and phosphorus fractions in organically managed tomato fields, *Soil*

- Science Society of America Journal*, 2015, Vol. 79, No. 3, pp. 772–782.
34. Murphy D.V., Cookson W.R., Braimbridge M., Marschner P., Jones D.L., Stockdale E.A., Abbott L.K., Relationships between soil organic matter and the soil microbial biomass (size, functional diversity, and community structure) in crop and pasture systems in a semi-arid environment, *Soil Research*, 2011, Vol. 49, No. 7, pp. 582–594.
35. Ndzelu B.S., Dou S., Zhang X., Zhang Y., Molecular composition and structure of organic matter in density fractions of soils amended with corn straw for five years, *Pedosphere*, 2023, Vol. 33, No. 2, pp. 372–380.
36. Plaza C., Courtier-Murias D., Fernández J.M., Polo A., Simpson A.J., Physical, chemical, and biochemical mechanisms of soil organic matter stabilization under conservation tillage systems: A central role for microbes and microbial by-products in C sequestration, *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, Vol. 57, pp. 124–134.
37. Moldoveanu S.C. (Ed.), *Pyrolysis of organic molecules: applications to health and environmental issues*, Amsterdam: Elsevier Science Bv, 2019, 711 p.
38. Rumpel C., González-Pérez J.A., Bardoux G., Largeau C., Gonzalez-Vila F.J., Valentin C., Composition and reactivity of morphologically distinct charred materials left after slash-and-burn practices in agricultural tropical soils, *Organic Geochemistry*, 2007, Vol. 38, No. 6, pp. 911–920.
39. Saiz-Jimenez C., De Leeuw J.W., Chemical characterization of soil organic matter fractions by analytical pyrolysis-gas chromatography-mass spectrometry, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 1986, Vol. 9, No. 2, pp. 99–119.
40. Šimon T., Javůrek M., Mikanová O., Vach M., The influence of tillage systems on soil organic matter and soil hydrophobicity, *Soil and Tillage Research*, 2009, Vol. 105, No. 1, pp. 44–48.
41. Spargo J.T., Cavigelli M.A., Alley M.M., Maul J.E., Buyer J.S., Sequeira C.H., Follett R.F., Changes in soil organic carbon and nitrogen fractions with duration of no-tillage management, *Soil Science Society of America Journal*, 2012, Vol. 76, No. 5, pp. 1624–1633.
42. Van Boxtel G., Laboissière R., Wilhelm H.D., gsignal: Signal processing, 2021, URL: <https://github.com/gjmvanboxtel/gsignal>.
43. Vieira F.C.B., Bayer C., Zanatta J.A., Dieckow J., Mielniczuk J., He Z.L., Carbon management index based on physical fractionation of soil organic matter in an Acrisol under long-term no-till cropping systems, *Soil and Tillage Research*, 2007, Vol. 96, No. 1, pp. 195–204.
44. Vives-Peris V., de Ollas C., Gómez-Cadenas A., Pérez-Clemente R.M., Root exudates: from plant to rhizosphere and beyond, *Plant Cell Reports*, Vol. 39, No. 1, pp. 3–17.

45. Volkov D.S., Rogova O.B., Proskurnin M.A., Organic matter and mineral composition of silicate soils: FTIR comparison study by photoacoustic, diffuse reflectance, and attenuated total reflection modalities, *Agronomy*, 2021, Vol. 11, No. 9, p. 189.
46. Weil R., Magdoff F., Significance of soil organic matter to soil quality and health, *Soil organic matter in sustainable agriculture*, 2004, pp. 1–43.
47. Wickham H., ggplot2: Elegant graphics for data analysis, New York: Springer-Verlag, 2016.
48. Wickham H., François R., Henry L., Müller K., Vaughan D., dplyr: A grammar of data manipulation. R package version 1.1.4, 2023, URL: <https://github.com/tidyverse/dplyr>.
49. Wynn J.G., Harden J.W., Fries T.L., Stable carbon isotope depth profiles and soil organic carbon dynamics in the lower Mississippi Basin, *Geoderma*, 2006, Vol. 131, No. 1, pp. 89–109.
50. Yang S., Jansen B., Absalah S., Kalbitz K., Chunga Castro F.O., Cammeraat E.L.H., Soil organic carbon content and mineralization controlled by the composition, origin and molecular diversity of organic matter: A study in tropical alpine grasslands, *Soil and Tillage Research*, 2022, Vol. 215, pp. 105–203.
51. Zhao C., Jiang E., Chen A., Volatile production from pyrolysis of cellulose, hemicellulose and lignin, *Journal of the Energy Institute*, 2017, Vol. 90, No. 6, pp. 902–913.



Ссылки для цитирования:

Беляева С.А., Мамонтов В.Г., Поляков А.М. Элементный состав гумусовых кислот чернозема типичного целинного // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2025. Вып. 125. С. 274-292.
DOI: 10.19047/0136-1694-2025-125-274-292

Cite this article as:

Belyaeva S.A., Mamontov V.G., Polyakov F.M., The elemental composition of humic acids in typical virgin chernozem, Dokuchaev Soil Bulletin, 2025, V. 125, pp. 274-292, DOI: 10.19047/0136-1694-2025-125-274-292

Элементный состав гумусовых кислот чернозема типичного целинного

© 2025 г. С. А. Беляева*, В. Г. Мамонтов,
А. М. Поляков*****

*Российский государственный аграрный университет –
МСХА им. К.А. Тимирязева, Россия,
127434, Москва, ул. Тимирязевская, 49,*

*<https://orcid.org/0000-0003-1347-0741>, e-mail: belyaevasa@inbox.ru,
**<https://orcid.org/0000-0003-2563-8783>, e-mail: mamontov1954@inbox.ru,
***[e-mail: amp7616i@rambler.ru](mailto:amp7616i@rambler.ru).

*Поступила в редакцию 14.03.2024, после доработки 13.06.2024,
принята к публикации 16.09.2025*

Резюме: Цель работы – изучить элементный состав гуминовых кислот (ГК), гиматомелановых кислот (ГМК) и фульвокислот (ФК) чернозема типичного целинного Курской области. Препараты гумусовых кислот получали экстракцией 0.1 н. раствором NaOH из декальцированной навески почвы по традиционной для нашей страны методике, очистку центрифугированием и электродиализом. ГМК экстрагировали из сырого геля этанолом до обесцвечивания раствора. В полученных препаратах гумусовых кислот определяли: зольность – весовым методом, содержание C, H, N – на автоматическом анализаторе CHNS-varioMicrocube, содержание O находили по разности, степень окисленности и теплоту сгорания – по эмпирическим формулам. Данные элементного состава выражали в массовых и атомных процентах. Самый высокий энергетический потенциал характерен для ГМК, теплота

сгорания 18.71 кДж/г. Самый низкий для ФК – 10.99 кДж/г. Согласно полученным данным, ГК чернозема сформированы в основном соединениями циклического типа и обеднены азотом, о чем свидетельствуют отношения Н : С, равное 0.87 и С : N, имеющее значение 16.5. Величина отношения О : С равна 0.50, а степень окисленности +0.13. ГМК и ФК имеют алифатическую природу – величины атомных отношений Н : С, равны 1.26 и 1.57 соответственно, что согласуется с литературными данными. ФК обогащены кислород- и азотсодержащими группировками, величины атомных отношений О : С и С : N, равны 0.90 и 10.8, степени окисленности +0.24. Среди гумусовых кислот ГМК в наибольшей мере обеднены азотсодержащими группировками, величина отношения С : N равна 22.8. В отличие от ГК и ФК, ГМК являются недоокисленными соединениями, что подтверждает величина отношения О : С – 0.44 и отрицательная степень окисленности -0.37. Таким образом, ГМК еще не прошли полностью этап гумификации. Согласно графико-статистическому анализу, их переход в ГК сопряжен с реакциями деметилирования и окисления, дополняемыми дегидрогенизацией. Переход от ГМК к ФК обусловлен четко выраженным процессом окисления, дополняемым слабо проявляющейся гидратацией. Положение гумусовых кислот на диаграмме в координатах степень окисленности (ω) – величина отношения Н : С свидетельствует, что они не только отличаются качеством структурных компонентов, но и находятся на разных стадиях гумификации.

Ключевые слова: гуминовые кислоты; гиматомелановые кислоты; фульвокислоты; атомные отношения; степень окисленности.

The elemental composition of humic acids in typical virgin chernozem

© 2025 S. A. Belyaeva^{*}, V. G. Mamontov^{**}, A. M. Polyakov^{***}

Russian State Agrarian University –
Moscow Timiryazev Agricultural Academy,

49 Timiryazevskaya Str., Moscow 127434, Russian Federation,

^{*}<https://orcid.org/0000-0003-1347-0741>, e-mail: belyaevasa@inbox.ru,

^{**}<https://orcid.org/0000-0003-2563-8783>, e-mail: mamontov1954@inbox.ru,

^{***}e-mail: amp7616i@rambler.ru.

Received 14.03.2024, Revised 13.06.2024, Accepted 16.09.2025

Abstract: The working purpose is to study the elemental composition of humic acids (HA), hymatomelanic acids (HMA) and fulvic acids (FA) in typical virgin chernozem of the Kursk Region. Humus acid preparations were

obtained by extraction with 0.1 N NaOH solution from a decalcified sample of soil according to the traditional method for our country, purification by centrifugation and electrodialysis. HMA were extracted from the crude gel with ethanol until the solution became colorless. In the resulting preparations of humus acids, the following parameters were determined: ash content by gravimetric method; C, H, N content by an automatic CHNS-varioMicrocube analyzer; O content was found as the difference; degree of oxidation and calorific value – by using empirical formulas. Elemental composition data were expressed in mass and atomic percentages. The highest energy potential is typical of HMA, the heat of combustion is 18.71 kJ/g. The lowest for FA is 10.99 kJ/g. According to the obtained data, chernozem HAs are formed mainly by cyclic compounds and are depleted in nitrogen, as evidenced by the H : C ratio (0.87) and C : N ratio (16.5). The O : C ratio is 0.50, and the oxidation degree is +0.13. HMA and FA are aliphatic in origin – the values of the H : C atomic ratios are 1.26 and 1.57, respectively, which corresponds well to the literature data. FAs are enriched with oxygen- and nitrogen-containing groups, the values of the atomic ratios O : C and C : N are 0.90 and 10.8, the degree of oxidation is +0.24. Among humus acids, HMAs are most depleted in nitrogen-containing groups; the C : N ratio is 22.8. Unlike HA and FA, HMA are under-oxidized compounds, which is confirmed by the O : C ratio of 0.44 and the negative degree of oxidation -0.37. Thus, HMAs have not yet completely passed the humification stage. According to the graph-statistical analysis, their transition to HA is associated with demethylation and oxidation reactions, supplemented by dehydrogenation. The transition from HMA to FA is due to a clearly expressed oxidation process, complemented by weakly manifested hydration. The position of humic acids on the diagram in coordinates of the degree of oxidation (ω) – the value of the H : C ratio indicates that they not only differ in the quality of their structural components, but are also at different stages of humification.

Keywords: humic acids; humatemelanic acids; fulvic acids; atomic ratios; degree of oxidation.

ВВЕДЕНИЕ

Важнейшим компонентом органического вещества автоморфных почв являются гумусовые кислоты. От их качественных и количественных особенностей и соотношения между ними прямо или косвенно зависят практически все свойства и режимы почвы. Согласно современным представлениям в составе гумусовых кислот выделяют три группы компонентов: гуминовые кислоты

(ГК), гиматомелановые кислоты (ГМК) и фульвокислоты (ФК) (Орлов и др., 2005). Такая классификация гумусовых кислот почвы является общепринятой в отечественном почвоведении.

Однако при этом необходимо отметить два обстоятельства. Одно из них заключается в том, что ГМК длительное время выделялись не как группа гумусовых веществ, а как спирторастворимая фракция ГК (Кононова, 1963). Лишь сравнительно недавно они были отнесены Д.С. Орловым (Орлов, 1990), по-видимому, преимущественно на основании работ Г.И. Глебовой (Глебова, 1985), в самостоятельную группу гумусовых веществ почвы.

Второе обстоятельство касается ФК. По существу, этим термином в почвоведении обозначаются две группы органических веществ почвы (Заварзина и др., 2021). Одна из них – так называемые ФК по Тюрину – представляет собой все кислоторастворимые вещества, выделяемые при анализе фракционно-группового состава гумуса. В ее состав входят как собственно ФК, так и разнообразные неспецифические органические соединения почвы (Орлов, 1990). Сам И.В. Тюрин считал, что образование ФК происходит за счет конденсации продуктов распада полисахаридов (или полиуронидов) с промежуточными продуктами распада белков (Тюрин, 1965).

Вторая группа представлена “истинными” ФК, очистка которых от неспецифических органических соединений осуществляется с помощью смолы DAX-8 или по Форситу путем адсорбции кислого раствора, остающегося после осаждения ГК и ГМК на активированном угле.

Состав и свойства этих двух групп ФК различны (Уланкина, 2002). По сравнению с ФК по Тюрину, ФК по Форситу имеют более высокую оптическую плотность и степень окисленности. Они более однородны по молекулярно-массовому составу и имеют меньшие значения молекулярных масс, что является следствием обогащенности ФК по Тюрину неспецифическими органическими соединениями.

Однако, несмотря на это, следует отметить, что данные именно о содержании ФК по Тюрину используются для оценки качественного состава гумуса, который устанавливают по величине отношения $C_{\text{гк}} : C_{\text{фк}}$ (Орлов и др., 2005; Чеботарев, Лебедева,

2023; Шеуджен и др., 2023).

Представляется, что, несмотря на значительную условность группы ФК по Тюрину, оценка ее состава и свойств может быть перспективной при сравнительных исследованиях как генетического плана, так и при характеристике особенностей агрогенного воздействия на органическое вещество почвы.

Элементный состав является фундаментальной характеристикой любых органических соединений, в том числе и гумусовых кислот почвы. Поэтому не случайно к настоящему времени накоплен большой объем информации, характеризующий особенности элементного состава гумусовых кислот, как почв разных типов, так и других природных объектов (Rice, MacCarthy, 1991; Шигабаева, 2014; Лодыгин и др., 2016; Бажина и др., 2019; Шевцова и др., 2019; Перминова, 2000; Орлов и др., 2005; Завьялова и др., 2022).

При этом следует отметить, что обычно исследователи изучают какую-то одну гумусовую кислоту, реже – две и очень редко в литературе приводятся данные, характеризующие элементный состав всех трех групп гумусовых кислот, экстрагированных из одной почвы (Глебова, 1985; Рыбчук, Смирнова, 2019). Причем до настоящего времени наименее изученной остается группа гиматомелановых кислот почвы.

Цель наших исследований – изучить элементный состав ГК, ГМК и ФК, выделенных из гумусово-аккумулятивного горизонта чернозема типичного целинного.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования служил чернозем типичный мощный тяжелосуглинистый на карбонатном лессовидном суглинке. Название почвы по WRB (2022) – Haplic Chernozem (Loamic, Pachic). Почвенные образцы отбирали в Центрально-Черноземном государственном биосферном заповеднике им. А.А. Алексина на участке целинной некосимой степи из слоя 0–20 см гумусово-аккумулятивного горизонта A. Свойства этого объекта хорошо изучены и неоднократно освещались в литературе (Путеводитель..., 1974; Когут и др., 2019; Мамонтов и др., 2020; Артемьева и др., 2021, 2022). Климат умеренный. Среднемноголетняя темпе-

ратура воздуха равна +5.8 °С. Среднегодовое количество осадков составляет 570 мм, $C_{оп}$ 4.8–5.1%, pH 6.8–6.9. Почвообразующими породами являются Валдайские лессовидные суглинки тяжелого гранулометрического состава, подстилаемые Днепровскими суглинками среднего гранулометрического состава.

Гумусовые кислоты экстрагировали 0.1 н. раствором NaOH после предварительного декальцинирования навески почвы до предельного извлечения по стандартной методике (Орлов, Гришина, 1981). ГК и ГМК осаждали 10%-ным раствором HCl и отделяли от надосадочной жидкости центрифугированием. Кислый раствор, содержащий ФК по Тюрину, пропускали через катионит в Н-форме, упаривали и подвергали электродиализу, после чего высушивали под феном досуха.

Сырой гель, состоящий из ГК и ГМК, растворяли в 0.1 н. растворе NaOH и очищали от коллоидных частиц центрифугированием в течение 30 мин при 8 000 об/мин, после чего пропускали через свечу Шамберлена. ГК и ГМК осаждали из очищенного от коллоидов раствора 10%-ным раствором HCl и отделяли от надосадочной жидкости центрифугированием. Сырой гель ГК и ГМК подвергали электродиализу, после чего экстрагировали ГМК из сырого геля этанолом до обесцвечивания раствора. Высушивали ГК и ГМК на кипящей водяной бане.

В полученных препаратах гумусовых кислот определяли: зольность весовым методом после сухого сжигания, содержание C, H, N на автоматическом анализаторе CHNS-varioMicrocube, содержание O находили по разности, степень окисленности и теплоту сгорания – по эмпирическим формулам (Орлов, Гришина, 1981).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты элементного анализа гумусовых кислот чернозема типичного целинного представлены в таблице 1.

Согласно полученным данным, больше всего гумусовые кислоты содержат углерода – 41.03–57.51 мас. %, вторым по значимости элементом является кислород, количество которого находится в пределах 33.88–49.16 мас. %. Содержание водорода составило 4.05–6.07 мас. %, а азота – 2.54–4.41 мас. %. Такой элемент-

ный состав характерен для гумусовых кислот почвы (Rice, MacCarthy, 1991; Орлов и др., 2005; Мамонтов, 2023).

Таблица 1. Элементный состав гумусовых кислот чернозема типичного целинного, $M \pm m \cdot t_{05}$ (среднее \pm доверительный интервал), мас. %

Table 1. Elemental composition of humic acids in Haplic Chernozem, $M \pm m \cdot t_{05}$ (average \pm confidence interval), wt. %

Вариант	Зольность, %	C	H	N	O
ГК	1.81 ± 0.02	55.36 ± 0.05	4.05 ± 0.11	3.95 ± 0.03	36.64 ± 0.08
ГМК	1.50 ± 0.02	57.51 ± 0.24	6.07 ± 0.09	2.54 ± 0.09	33.88 ± 0.05
ФК	4.50 ± 0.01	41.03 ± 0.02	5.40 ± 0.01	4.41 ± 0.05	49.16 ± 0.02

При этом между гумусовыми кислотами имеются довольно существенные различия. Больше всего углерода – 57.51 мас. % содержат ГМК. Это на 4% больше, чем у ГК, и почти на 30% больше, чем у ФК. По содержанию водорода ФК и ГМК не очень существенно различаются между собой, тогда как ГК содержат на 25–33% меньше этого элемента. Содержание кислорода самое высокое у ФК – 49.16 мас. %, что более чем на 25% выше, чем у ГК и ГМК. Самое низкое содержание кислорода присуще ГМК, на 6% меньше, чем у ГК, относительно ФК. ФК содержат больше всего азота – 4.41 мас. %, у ГК его количество меньше на 10%, тогда как у ГМК более чем на 40%.

Таким образом, отличие ГМК от ГК по элементному составу заключается в меньшем содержании азота и особенно кислорода и более высоком содержании углерода и водорода, что согласуется с литературными данными (Глебова, 1985; Рыбачук, Смирнова, 2019). Хотя по содержанию водорода ФК и ГМК сближаются между собой, по содержанию других химических элементов, особенно углерода и кислорода, они заметно отличаются друг от друга.

Гумусовые кислоты являются важным источником энергии, сведения о которой необходимы для разработки вопросов энергетики почвообразования. Такие данные могут быть получены на основании их теплоты сгорания, рассчитанной по элементному

составу гумусовых кислот, выраженному в мас. % (Ковда, 1973; Орлов и др., 2005). Величины теплоты сгорания гумусовых кислот чернозема типичного целинного приведены в таблице 2.

Таблица 2. Теплота сгорания гумусовых кислот чернозема типичного целинного, $M \pm m \cdot t05$ (среднее \pm доверительный интервал), кДж/г.

Table 2. Heat of combustion of humic acids in Haplic Chernozem, $M \pm m \cdot t05$ (average \pm confidence interval), kJ/g.

ГК	ГМК	ФК
18.31 ± 0.04	18.71 ± 0.01	10.99 ± 0.04

Как следует из полученных данных, самая высокая теплота сгорания – 18.71 кДж/г присуща ГМК, у ГК она близка к этому показателю и составила 18.31 кДж/г. Самый низкий энергетический потенциал характерен для ФК. Он почти на 40% меньше, чем у ГК и ГМК.

Считается, что результаты, выраженные в мас. %, не дают истинного представления об особенностях элементного состава гумусовых веществ. Оно может быть получено лишь в том случае, когда элементный состав выражают в ат. % (Орлов, 1990). Полученные данные представлены в таблице 3.

Таблица 3. Элементный состав гумусовых кислот чернозема типичного целинного, $M \pm m \cdot t05$ (среднее \pm доверительный интервал), ат. %

Table 3. Elemental composition of humic acids in Haplic Chernozem, $M \pm m \cdot t05$ (average \pm confidence interval), at. %

Вариант	C	H	N	O
ГК	41.2 ± 0.4	35.8 ± 0.5	2.5 ± 0.1	20.5 ± 0.3
ГМК	36.5 ± 0.4	45.8 ± 0.5	1.6 ± 0.1	16.1 ± 0.1
ФК	28.1 ± 0.3	44.0 ± 0.3	2.6 ± 0.1	25.3 ± 0.2

Согласно полученным данным, в элементном составе ГК чернозема типичного целинного преобладает углерод, содержание

которого составило 41.2 ат. %. В то время как в элементном составе ФК и ГМК превалирует водород – 44.0 и 45.8 ат. % соответственно, что на 19–22% больше, чем в ГК. Эти кислоты содержат меньше углерода, чем ГК, ГМК на 11%, а ФК – на 32%.

Среди всех гумусовых кислот чернозема самое высокое содержание кислорода присуще ФК – 25.3 ат. %, что на 19% больше, чем у ГК и на 36%, чем у ГМК. Самое низкое количество азота содержат ГМК – 1.6 ат. %, в то время как в ФК и ГК его содержание больше на 62% и 56% соответственно.

Таким образом, судя по элементному составу гумусовых кислот чернозема типичного целинного, выраженному в ат. %, ГМК заметно отличаются от ГК. Они содержат на 22% больше водорода, но меньше азота (на 56%), кислорода (на 17%) и углерода (на 11%) и могут быть отнесены к самостоятельной группе гумусовых кислот почвы.

Одним из способов интерпретации данных элементного состава гумусовых веществ в ат. % является нахождение атомных отношений, позволяющих получить определенное представление о строении их молекул (табл. 4).

Таблица 4. Атомные отношения и степень окисленности гумусовых кислот чернозема типичного целинного

Table 4. Atomic ratios and degree of oxidation of humic acids in Haplic Chernozem

Вариант	H : C	O : C	C : N	ω
ГК	0.87 ± 0.03	0.50 ± 0.01	16.5 ± 0.2	$+0.13 \pm 0.03$
ГМК	1.26 ± 0.03	0.44 ± 0.01	22.8 ± 0.8	-0.37 ± 0.02
ФК	1.57 ± 0.02	0.90 ± 0.02	10.8 ± 0.4	$+0.24 \pm 0.01$

Гумусовые кислоты чернозема типичного целинного заметно различаются между собой величинами атомных отношений и степенью окисленности. Судя по величине атомного отношения H : C, равному 0.87, молекулы ГК чернозема сформированы в основном циклическими структурами при заметном вкладе в состав

молекул алифатических компонентов. При этом довольно большая величина отношения С : N, оказавшаяся равной 16.5, свидетельствует об очень низкой обогащенности ГК азотсодержащими группировками. Величина отношения O : C равна 0.50, а степень окисленности +0.13.

ГМК и ФК заметно отличаются от ГК своей алифатической природой, о чем свидетельствуют величины атомных отношений Н : C, равные 1.26 и 1.57 соответственно. Обусловлено это обогащенностью ГМК фрагментами углеводного типа, а ФК значительным количеством неспецифических органических соединений. Наряду с этим, по сравнению с ГК, молекулы ФК гораздо в большей мере обогащены кислород- и азотсодержащими группировками. Об этом можно судить по величинам атомных отношений O : C и C : N, равным 0.90 и 10.8 соответственно, и степени окисленности, находящейся на уровне +0.24. ГМК присуща самая низкая величина отношения O : C (0.44) и отрицательная степень окисленности, равная -0.37. Среди гумусовых кислот они в наибольшей мере обеднены азотсодержащими группировками, о чем свидетельствует величина отношения С : N, являющаяся самой высокой и достигающей 22.8 (Глебова, 1985).

Таким образом, между гумусовыми кислотами чернозема типичного целинного имеются как сходства, так и различия. Если ГК и ФК являются окисленными соединениями, то ГМК, в отличие от них, содержат в своем составе значительное количество недоокисленных компонентов. С другой стороны, в составе молекул ФК и ГМК отчетливо преобладают алифатические структуры, тогда как молекулы ГК преимущественно сформированы соединениями циклического типа. ФК заметно отличаются от ГК и ГМК гораздо более высоким вкладом азотсодержащих группировок в построение их молекул. Если обогащенность ФК азотом средняя, то ГК и ГМК – очень низкая (Орлов и др., 2004).

Одним из способов интерпретации элементного состава гумусовых кислот является графико-статистический анализ, позволяющий выявить основные химические изменения и процессы, происходящие с ними при гумификации (Орлов и др., 2005; Черников, 2005).

Оценка элементного состава гумусовых кислот чернозема с

помощью графико-статистического анализа показала, что на диаграмме атомных отношений $\text{H} : \text{C}$ и $\text{O} : \text{C}$ они занимают три обособленные области (рис. 1). В самой нижней части диаграммы расположены ГК, ГМК и ФК отчетливо сдвинуты вверх и в стороны.

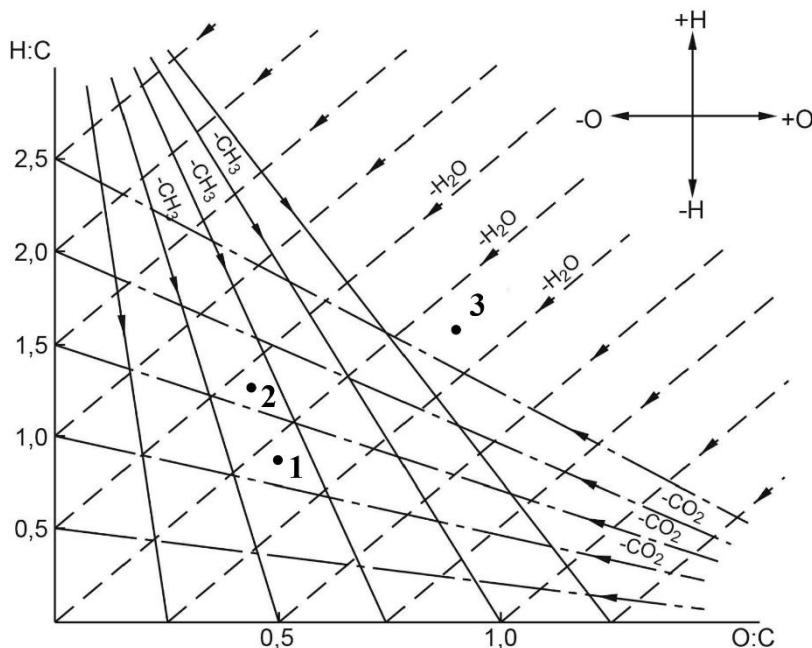


Рис. 1. Диаграмма атомных отношений $\text{H} : \text{C} - \text{O} : \text{C}$ (по Д. Ван Кревелену): 1 – ГК, 2 – ГМК, 3 – ФК.

Fig. 1. Diagram of atomic ratios $\text{H} : \text{C} - \text{O} : \text{C}$ (according to D. Van Krevelen): 1 – HA, 2 – HMA, 3 – FA.

Гумификация по своей природе процесс окислительный (Александрова, 1980; Орлов и др., 2005). Поэтому можно предположить, что ГМК, которые характеризуются довольно высокой отрицательной степенью окисленности, еще не прошли полностью этап гумификации. Согласно графико-статистическому анализу,

их переход в ГК сопряжен с отчетливо выраженными реакциями деметилирования и окисления, дополняемыми дегидрогенизацией.

Считается, что в почве ГК и ФК образуют единую систему, в которой ГК связывают в комплексы определенное количество ФК в соответствии с условиями температуры и влажности в “момент” образования (Дергачева, 2008). Обособление ФК от ГК, согласно графико-статистическому анализу, происходит благодаря процессам гидратации и окисления. Переход от ГМК к ФК обусловлен четко выраженным процессом окисления, дополняемым слабо проявляющейся гидратацией.

Для характеристики элементного состава гумусовых кислот чернозема наряду с графико-статистическим анализом была использована диаграмма, предложенная Глебовой (Глебова, Орлов, 1980), для построения которой используется величина отношения Н : С и степень окисленности (рис. 2).

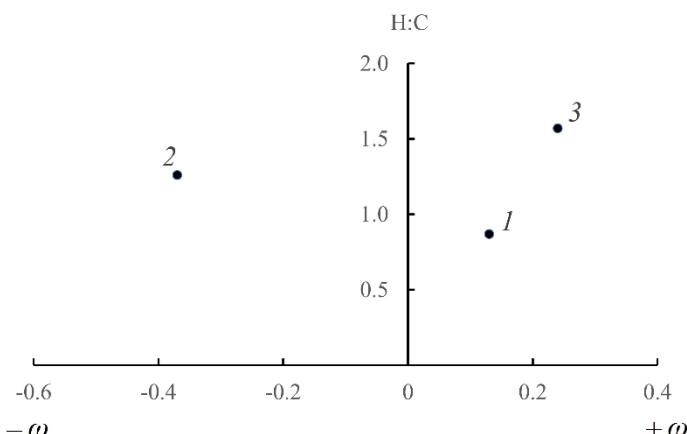


Рис. 2. Диаграмма атомных отношений Н : С и степени окисленности: 1 – ГК, 2 – ГМК, 3 – ФК.

Fig. 2. Diagram of atomic ratios H : C and degree of oxidation: 1 – HA, 2 – HMA, 3 – FA.

На рисунке 2 отчетливо обнаруживаются разные области приуроченности гумусовых кислот на диаграмме в соответствии с неодинаковой их обогащенностью алифатическими и кислородсодержащими группировками и степенью окисленности. Это, вероятно, может служить не только подтверждением различий в качестве структурных компонентов, формирующих гумусовые кислоты чернозема, но и указанием на то, что они находятся на разных стадиях гумификации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Гумусовые кислоты чернозема типичного целинного имеют как сходства, так и различия. ГК чернозема сформированы в основном соединениями циклического типа, тогда как в составе молекул ФК и ГМК отчетливо преобладают алифатические структуры. ФК заметно отличаются от ГК и ГМК гораздо более высоким вкладом азотсодержащих группировок в строение их молекул. Если ГК и ФК являются окисленными соединениями, то ГМК, в отличие от них, содержат в своем составе значительное количество недоокисленных компонентов.

Самый высокий энергетический потенциал характерен для ГМК, самый низкий – для ФК.

ГМК заметно отличаются от ГК и могут быть отнесены к самостоятельной группе гумусовых кислот почвы.

Гумусовые кислоты чернозема типичного не только различаются качеством структурных компонентов, формирующих их молекулы, они находятся на разных стадиях гумификации. ГМК, которые характеризуются высокой отрицательной степенью окисленности, еще не прошли полностью этап гумификации. Их переход в ГК сопряжен с отчетливо выраженными реакциями деметилирования и окисления, дополняемыми дегидрогенизацией.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александрова Л.Н. Органическое вещество почвы и процессы его трансформации. Л.: Наука, 1980. 288 с.
2. Артемьева З.С., Данченко Н.Н., Зазовская Э.П., Колягин Ю.Г., Кириллова Н.П., Когут Б.М. Изотопный состав углерода и химическая структура органического вещества типичного чернозема в условиях

контрастного землепользования // Почвоведение. 2021. № 6. С. 686–700.
DOI: <https://doi.org/10.31857/S0032180X21060034>.

3. Артемьева З.С., Зазовская Э.П., Засухина Е.С., Цомаева Е.В., Когут Б.М. Изотопный состав углерода пульв органического вещества типичного чернозема // Вестник Московского Университета. Серия 17. Почвоведение. 2022. № 4. С. 54–62.

4. Бажина Н.Л., Захарова Е.С., Дергачева М.И. Сравнительный анализ гумусовой составляющей тундровых почв Тувы и горного Алтая, сформировавшихся в одинаковых экологических условиях // Научные ведомости. Сер. Естественные науки. 2019. Т. 43. № 4. С 337–343. DOI: <https://doi.org/10.18413/2075-4671-2019-43-4-337-34>.

5. Глебова Г.И. Гиматомелановые кислоты почв. М.: Изд-во МГУ, 1985. 74 с.

6. Глебова Г.И., Орлов Д.С. Элементный состав и коэффициенты экстинкции гиматомелановых кислот // Научные доклады Высшей школы. Биологические науки. 1980. № 9. С. 95–107.

7. Дергачева М.И. Гумусовая память почв // Память почв: Почва как память биосферно-геосферно-антропосферных взаимодействий. М.: Издательство ЛКИ, 2008. С. 530–560.

8. Заварзина А.Г., Данченко Н.Н., Демин В.В., Артемьева З.С., Когут Б.М. Гуминовые вещества – гипотезы и реальность (обзор). // Почвоведение. 2021. № 12. С. 1449–1480. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0032180X21120169>.

9. Заяцкова Н.Е., Васильева М.Т., Фомин Д.С. Элементный состав и структура гуминовых кислот дерново-подзолистой почвы длительного стационарного опыта и ее целинных аналогов // Агрохимия. 2022. № 9. С. 15–25. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002188122090149>.

10. Ковда В.А. Основы учения о почвах. М.: Наука, 1975. Т. 1. 448 с.

11. Когут Б.М., Артемьева З.С., Кириллова Н.П., Яшин М.А., Сошикова Е.И. Компонентный состав органического вещества воздушно-сухих и водоустойчивых макроагрегатов типичного чернозема в условиях контрастного землепользования // Почвоведение. 2019. № 2. С. 161–170. DOI: <https://doi.org/10.1134/S106422931902008X>.

12. Кононова М.М. Органическое вещество почвы. Его природа, свойства и методы изучения. М.: АН СССР, 1963. 315 с.

13. Лодыгин Е.Д., Безносиков В.А., Василевич Р.С. Изучение элементного состава гуминовых и фульвокислот почв таежных и тундровых ландшафтов // Вестник ИБ Коми НЦ УрО РАН. 2016. № 4(198). С. 10–18.

14. Мамонтов В.Г. Общее почвоведение. М.: КНОРУС, 2023. 554 с.

15. Мамонтов В.Г., Артемьева З.С., Лазарев В.И., Родионова Л.П., Крылов В.А., Ахмедзянова Р.Р. Сравнительная характеристика свойств

- целинного, пахотного и залежного чернозема типичного Курской области // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2020. Вып. 101. С. 182–201. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-101-182-201>.
16. Орлов Д.С. Гумусовые кислоты почв и общая теория гумификации. М.: Изд-во МГУ, 1990. 325 с.
17. Орлов Д.С., Гришина Л.А. Практикум по химии гумуса. М.: МГУ, 1981. 272 с.
18. Орлов Д.С., Бирюкова О.Н., Розанова М.С. Дополнительные показатели гумусного состояния почв и их генетических горизонтов // Почтоведение. 2004. № 8. С. 918–926.
19. Орлов Д.С., Садовникова Л.К., Суханова Н.И. Химия почв. М.: Высш. шк., 2005. 558 с.
20. Перминова И.В. Анализ, классификация и прогноз свойств гумусовых кислот: Автoref. дис. ... докт. хим. наук. М., 2000. 50 с.
21. Путеводитель почвенной экскурсии “Восточно-Европейская равнина. Лесостепная и степная зоны”. М.: Наука, 1974. 96 с.
22. Рыбачук О.В., Смирнова А.О. Гиматомелановые кислоты почв // Инновации и инвестиции. 2019. № 12. С. 197–199.
23. Тюрин И.В. Органическое вещество почвы и его роль в плодородии. М.: Наука, 1965. 320 с.
24. Уланкина А.В. Сравнительная характеристика фульвокислот, выделенных по методам Тюрина и Форсита: Автoref. дис. ... канд. биол. наук. М., 2002. 24 с.
25. Чеботарев Н.Т., Лебедева С.С. Особенности трансформации гумусовых веществ дерново-подзолистой почвы при агрогенных воздействиях на территории Республики Коми // Агрохимический вестник. 2023. № 3. С. 16–19. DOI: <https://doi.org/10.24412/1029-2551-2023-3-004>.
26. Черников В.А. Методы структурной диагностики органического вещества почв // Методы исследования органического вещества почв. М., 2005. С. 135–147.
27. Шевцова Л.К., Черников В.А., Сычев В.Г., Беличенко М.В., Рухович О.В., Иванова О.И. Влияние длительного применения удобрений на состав, свойства и структурные характеристики гумусовых кислот основных типов почв. Сообщение 1 // Агрохимия. 2019. № 10. С. 3–15.
28. Шеуджсен А.Х., Гуторова О.А., Хурум Х.Д., Ашинов Ю.Н. Изменение свойств лугово-черноземной почвы рисового агроценоза при применении удобрений // Плодородие. 2023. № 2(131). С. 80–82. DOI: <https://doi.org/10.25680/S19948603.2023.131.18>.

29. Шигабаева Г.Н. Элементный состав и содержание функциональных групп гуминовых веществ почв и торфов различного происхождения // Вестник Тюменского гос. ун-та. 2014. № 12. Экология. С. 45–53.
30. Rice J.A., MacCarthy P. Statistical evaluation of the elemental composition of humic substances // Org. Geochem. 1991. Vol. 17. No. 5. P. 635–648. DOI: [https://doi.org/10.1016/0146-6380\(91\)90006-6](https://doi.org/10.1016/0146-6380(91)90006-6).

REFERENCES

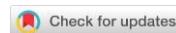
1. Aleksandrova L.N., *Organicheskoe veshchestvo pochvy i protsessy ego transformatsii* (Soil organic matter and its transformation processes), Leningrad: Nauka, 1980, 288 p.
2. Artem'eva Z.S., Danchenko N.N., Zazovskaya E.P., Kolyagin Yu.G., Kirillova N.P., Kogut B.M., Izotopnyi sostav ugleroda i khimicheskaya struktura organicheskogo veshchestva tipichnogo chernozema v usloviyakh kontrastnogo zemlepol'zovaniya (Natural ^{13}C Abundance and Chemical Structure of Organic Matter of Haplic Chernozem under Contrasting Land Uses), *Pochvovedenie*, 2021, No. 6, pp. 686–700, DOI: <https://doi.org/10.31857/S0032180X21060034>.
3. Artem'eva Z.S., Zazovskaya E.P., Zasukhina E.S., Tsomaeva E.V., Kogut B.M., Izotopnyi sostav ugleroda pulov organicheskogo veshchestva tipichnogo chernozema (Natural ^{13}C Abundance of the organic matter pools in Haplic Chernozem), *Vestnik Moskovskogo Universiteta, Ser. 17, Pochvovedenie*, 2022, No. 4, pp. 54–62.
4. Bazhina N.L., Zakharova E.S., Dergacheva M.I., Sravnitel'nyi analiz gumusovoi sostavlyayushchei tundraovykh pochv Tuvy i gornogo Altaya, sformirovavshikhsya v odinakovyh ekologicheskikh usloviyakh (Comparative analysis of the humus component of tundra soils of Tuva and Gorny Altai, formed in the same ecological conditions), *Nauchnye vedomosti. Ser. Estestvennye nauki*, 2019, Vol. 43, No. 4, pp. 337–343, DOI: <https://doi.org/10.18413/2075-4671-2019-43-4-337-34>.
5. Glebova G.I., *Gimatomelanovye kisloty pochv* (Himatomelanic acids of soils), Moscow: Moscow State University, 1985, 74 p.
6. Glebova G.I., Orlov D.S., Elementnyi sostav i koefitsienty ekstinktsii himatomelanovykh kislot (Elemental composition and extinction coefficients of himatomelanic acids), *Nauchnye doklady Vysshei shkoly. Biologicheskie nauki*, 1980, No. 9, pp. 95–107.
7. Dergacheva M.I., Gumusovaya pamyat' pochv (Humus memory of soils), In: *Pamyat' pochv: Pochva kak pamyat' biosferno-geosferno-antropsfernykh vzaimodeistvii* (Soil memory. Soil as a memory of Biosphere-Geosphere-Anthroposphere interactions), Moscow: Izdatel'stvo LKI, 2008, pp. 530–560

(687 p.)

8. Zavarzina A.G., Danchenko N.N., Demin V.V., Artem'eva Z.S., Kogut B.M., Guminovye veshchestva – gipotezy i real'nost' (obzor) (Humic substances – hypotheses and reality (review)) *Pochvovedenie*, 2021, No. 12, pp. 1449–1480, DOI: <https://doi.org/10.31857/S0032180X21120169>.
9. Zav'yalova N.E., Vasbieva M.T., Fomin D.S., Elementnyi sostav i struktura guminovykh kislot dernovo-podzolistoi pochvy dlitel'nogo statsionarnogo optya i ee tselinnykh analogov (Elemental composition and structure of humic acids in soddy-podzolic soil of long-term stationary experiment and its virgin analogues), *Agrokhimiya*, 2022, No. 9, pp. 15–25, DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002188122090149>.
10. Kovda V.A., *Osnovy ucheniya o pochvakh* (Fundamentals of soil science), Moscow: Nauka, 1975, Vol. 1, 448 p.
11. Kogut B.M., Artem'eva Z.S., Kirillova N.P., Yashin M.A., Soshnikova E.I., Komponentnyi sostav organicheskogo veshchestva vozдушно-сухих i vodoustoichivyx makroaggregatov tipichnogo chernozema v usloviyakh kon-trastnogo zemlepol'zovaniya (Organic matter of the air-dried and water-stable macroaggregates of haplic chernozem in contrasting variants of land use), *Pochvovedenie*, 2019, No. 2, pp. 161–170, DOI: <https://doi.org/10.1134/S106422931902008X>.
12. Kononova M.M., *Organicheskoe veshchestvo pochvy. Ego priroda, svoistva i metody izucheniya* (Soil organic matter. Its nature, properties and methods of study), Moscow: AN SSSR, 1963, 315 p.
13. Lodygin E.D., Beznosikov V.A., Vasilevich R.S., Izuchenie elementnogo sostava guminovykh i ful'vokislot pochv taezhnykh i tundraovykh landshaftov (Research of the elemental composition of humic and fulvic acids in soils of taiga and tundra landscapes), *Vestnik IB Komi NTs UrO RAN*, 2016, No. 4(198), pp. 10–18.
14. Mamontov V.G., *Obshchee pochvovedenie* (General soil science), Moscow: KNORUS, 2023, 554 p.
15. Mamontov V.G., Artemyeva Z.S., Lazarev V.I., Rodionova L.P., Krylov V.A., Ahmetzyanova R.R., Comparative characteristics of the properties of Halpic Chernozem of the Kursk Region of different land use, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2020, Vol. 101, pp. 182–201, DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-101-182-201>.
16. Orlov D.S., *Gumusovye kisloty pochv i obshchaya teoriya gumifikatsii* (Humic acids of soils and the general theory of humification), Moscow: Moscow State University, 1990, 325 p.
17. Orlov D.S., Grishina L.A., *Praktikum po khimii gumusa* (Laboratory manual on humus chemistry), Moscow: Moscow State University, 1981, 272 p.

18. Orlov D.S., Biryukova O.N., Rozanova M.S., Dopolnitel'nye pokazateli gumusnogo sostoyaniya pochv i ikh geneticheskikh gorizontov (Revised system of the humus statusparameters of soils and their genetic horizons), *Pochvovedenie*, 2004, No. 8, pp. 918–926.
19. Orlov D.S., Sadovnikova L.K., Sukhanova N.I., *Khimiya pochv* (Soil chemistry), Moscow: Vyssh. shk., 2005, 558 p.
20. Perminova I.V., *Analiz, klassifikatsiya i prognoz svoistv gumusovykh kislot: Avtoref. diss... dokt. khim. nauk* (Analysis, classification and prediction of humic acid properties, Extended abstract of Dr. Chem. Sci. thesis), Moscow, 2000, 50 p.
21. X Mezhdunar. kongress pochvovedov, *Putevoditel' pochvennoi ekskursii "Vostochno-Evropeiskaya ravnina. Lesostepnaya i stepnaya zony"* (Guide to the soil excursion “East European Plain. Forest-steppe and steppe zones”), Moscow: Nauka, 1974, 96 p.
22. Rybachuk O.V., Smirnova A.O., Gimatomelanovye kisloty pochv (Hymatomelanic acids of soils), *Innovatsii i investitsii*, 2019, No. 12, pp. 197–199.
23. Tyurin I.V., *Organicheskoe veshchestvo pochvy i ego rol' v plodorodii* (Soil organic matter and its role in fertility), Moscow: Nauka, 1965, 320 p.
24. Ulankina A.V., *Sravnitel'naya kharakteristika ful'vokislot, vydelennykh po metodam Tyurina i Forsita. Avtoref. diss... kand. biol. nauk* (Comparative characteristics of fulvic acids isolated by Tyurin and Forsyth methods, Extended abstract of Cand. biol. sci. thesis), Moscow, 2002. 24 p.
25. Chebotarev N.T., Lebedeva S.S., Osobennosti transformatsii gumusovykh veshchestv dernovo-podzolistoi pochvy pri agrogennykh vozdeistviyah na territorii Respubliki Komi (Peculiarities of humic compounds transformation in soddy-podzolic soil under agrogenic pressure in the Komi Republic), *Agrokhimicheskii vestnik*, 2023, No. 3, pp. 16–19, DOI: <https://doi.org/10.24412/1029-2551-2023-3-004>.
26. Chernikov V.A., Metody strukturnoi diagnostiki organicheskogo veshchestva pochv (Methods of structural diagnostics of soil organic matter), In: *Metody issledovaniya organicheskogo veshchestva pochv* (Methods of soil organic matter research), Moscow, 2005, pp. 135–147.
27. Shevtsova L.K., Chernikov V.A., Sychev V.G., Belichenko M.V., Rukhovich O.V., Ivanova O.I., Vliyanie dlitel'nogo primeneniya udobrenii na sostav, svoistva i strukturnye kharakteristiki gumusovykh kislot osnovnykh tipov pochv (Effect of long-term application of fertilizers on the composition, properties and structural characteristics of humic acids in main soil types. Report 1), *Agrokhimiya*, 2019, No. 10, pp. 3–15.
28. Sheudzhen A.Kh., Gutorova O.A., Khurum Kh.D., Ashinov Yu.N., Izmenenie svoistv lugovo-chernozemnoi pochvy risovogo agrotsenoza pri

- применении удобрений (Changes in the properties of meadow-chernezh soil of the rice agroecosystem with the application of fertilizers), *Plodorodie*, 2023, No. 2(131), pp. 80–82, DOI: <https://doi.org/10.25680/S19948603.2023.131.18>.
29. Shigabaeva G.N., Elementnyi sostav i soderzhanie funktsional'nykh grupp guminovykh veshchestv pochv i torfov razlichnogo proiskhozhdeniya (Elemental composition and level of functional groups of humic substances in soils and turfs of different origin), *Vestnik Tyumenskogo gos. un-ta, Ecology*, 2014, No. 12. pp. 45–53.
30. Rice J.A., MacCarthy P., Statistical evaluation of the elemental composition of humic substances, *Org. Geochem.*, 1991, Vol. 17, No. 5, pp. 635–648, DOI: [https://doi.org/10.1016/0146-6380\(91\)90006-6](https://doi.org/10.1016/0146-6380(91)90006-6).



Cite this article as:

Kholmurodova M., Juliev M., Bakhodirova Sh., Abdikairov B., Israilov I., Rashidov Ja., Global research trends on RUSLE model: Bibliometric analysis using R Biblioshiny and VOSviewer, Dokuchaev Soil Bulletin, 2025, V. 125, pp. 293-327, DOI: 10.19047/0136-1694-2025-125-293-327

Global research trends on RUSLE model: Bibliometric analysis using R Biblioshiny and VOSviewer

© 2025 M. Kholmurodova^{1*}, M. Juliev^{1,2**}, Sh. Bakhodirova^{3***},
B. Abdikairov^{4****}, I. Israilov^{5*****}, Ja. Rashidov^{5*****}

¹*Institute of Fundamental and Applied Research,
National Research University TIIAME,
39A Kori Niyoziy, Tashkent 100000, Uzbekistan,
* e-mail: kholmurodovamadinabonul@gmail.com.*

²*Turin Polytechnic University in Tashkent,
17 Little Ring Road Str., Tashkent 100095, Uzbekistan,
** e-mail: mukhiddinjuliev@gmail.com.*

³*Tashkent State Technical University named after Islam Karimov,
2 University Str., Tashkent 100095, Uzbekistan,
*** e-mail: baxodirovash1991@gmail.com.*

⁴*Institute of Agriculture and Agrotechnologies of Karakalpakstan,
Abdametov Str., Nukus 230109, Uzbekistan,
**** e-mail: abdikairovbekmurat12@gmail.com.*

⁵*Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural Mechanization Engineers
National Research University,
39A Kori Niyoziy, Tashkent 100000, Uzbekistan,
***** e-mail: ibrohim07071995@gmail.com.
***** e-mail: j.rashidov@tiame.uz.*

Received 07.02.2025, Revised 26.02.2025, Accepted 16.09.2025

Abstract: Soil erosion is an unavoidable natural phenomenon that significantly endangers soil fertility and global land management. The primary objective of this study was to perform a thorough bibliometric analysis of research

pertaining to the extensively utilized RUSLE model for soil erosion modeling, aiming to identify significant research trends, impactful contributions, and existing knowledge gaps. This study selected articles published in English from 1987 to 2024 in the Scopus database. The analysis centered on indicators including the most productive year, journals, authors, keywords, topics, countries, affiliations, and citations. We used R Biblioshiny, VOSviewer, and mapchart.net to help us with the analysis. The results showed that 2023 was the best year for publications on this topic, with Environmental Earth Sciences and Modeling Earth Systems and Environment being the top journals. Renard K.G. and Li Y. were the authors, who wrote the most papers, and “soil erosion” was the word that was used the most. China and India also came out on top, which shows that they are more affected by erosion than other countries. Furthermore, the progression of RUSLE research has been identified as occurring in three distinct phases: an initial limited phase (1987–1996), a phase of steady growth (1997–2014) propelled by the integration of GIS and remote sensing, and a highly productive phase (2015– till present moment) characterized by technological advancements and heightened global awareness, especially in 2023. These results show how modern technologies are becoming more important for making soil erosion models more accurate and scalable. This bibliometric analysis gives a full picture of how soil erosion research is changing around the world. It gives useful information for future research and supports sustainable land management and farming practices that aim to stop land degradation.

Keywords: soil erosion; RUSLE; USLE; remote sensing (RS); geographic information systems (GIS).

Глобальные тренды в исследованиях на основе модели RUSLE: библиометрический анализ с использованием R Biblioshiny и VOSviewer

Резюме: Эрозия почвы – неизбежный естественный процесс, представляющий серьезную угрозу плодородию почв и управлению земельными ресурсами во всем мире. Основной целью данного исследования был тщательный библиометрический анализ исследований, посвященных широко используемой модели RUSLE для моделирования эрозии почвы, с целью выявления основных тенденций в исследованиях, значимых вкладов и существующих пробелов в знаниях. Для исследования были отобраны статьи на английском языке, опубликованные в базе данных Scopus в период с 1987 по 2024 гг. Анализ был сосредоточен на таких показателях, как наиболее продуктивный год, журналы, авторы, ключевые слова, темы, страны,

аффилиации и цитирования. В процессе анализа использовались такие инструменты, как R Biblioshiny, VOSviewer и mapchart.net. Результаты показали, что 2023 г. стал годом с максимальным количеством публикаций по этой теме, а ведущими журналами были Environmental Earth Sciences и Modeling Earth Systems and Environment. Ренард К.Г. и Ли И. стали авторами, опубликовавшими наибольшее число статей, а в поиске чаще всего употреблялось словосочетание “эрозия почвы”. Китай и Индия вышли на первое место, что свидетельствует о более выраженных эрозионных процессах в них по сравнению с другими странами. Кроме того, установлено, что развитие исследований с помощью модели RUSLE можно разделить на три этапа: начальная фаза ограниченного использования (1987–1996 гг.); фаза устойчивого роста (1997–2014 гг.), обусловленная интеграцией ГИС и дистанционного зондирования; и высокопродуктивная фаза (2015 г. – по настоящее время), характеризующаяся технологическим прогрессом и ростом популярности модели во всем мире, особенно в 2023 г. Эти результаты демонстрируют, как возрастает важность современных технологий в повышении точности и масштабируемости моделей эрозии почв. Данный библиометрический анализ предоставляет интерес и дополнительную информацию для будущих исследований с целью развития устойчивого земледелия и эффективного управления земельными ресурсами, методов ведения сельского хозяйства, направленных на предотвращение деградации земель.

Ключевые слова: почвенная эрозия; RUSLE; USLE; дистанционное зондирование (ДЗ); геоинформационные системы (ГИС).

INTRODUCTION

Soil erosion is an inevitable natural process that presents a significant threat to soil fertility and land management across the globe (Pennock, 2019; Abdi et al., 2023). This phenomenon can lead to environmental crises and jeopardize food security worldwide (Papaiordanidis et al., 2020; Al-hasn et al., 2024). To address these challenges and mitigate their impact, international organizations such as the United Nations have developed various strategies and initiatives. The implementation of Sustainable Development Goals (SDG) 2 and 15, part of a broader framework of 17 goals set to be achieved by 2030, is closely linked to combating soil erosion (Borrelli et al., 2017; Juliev et al., 2024). In order to ensure the successful application of these goals, scientists around the world are developing a range of approaches and

practices to prevent, assess, and counteract soil erosion (Borrelli et al., 2021; Wen et al., 2023). These methods are increasingly enhanced through modern technologies like remote sensing (RS) and geographic information systems (GIS), which enable more precise and effective outcomes (Abdelsamie et al., 2022).

According to data from the Global Applications of Soil Erosion Modeling Monitor (GASEMT) database, models such as RUSLE, USLE, WEPP, and SWAT are the most commonly used tools for predicting soil erosion globally (Borrelli et al., 2021). The RUSLE model, in particular, is widely preferred because it provides simple, reliable empirical calculations that are practical and effective for real-world applications (Borrelli et al., 2017; Bensekhria, Bouhata, 2022). RUSLE is an advanced version of the USLE model, which was originally developed by Wischmeier and Smith in 1965 (Ghosal, Das Bhattacharya, 2020). The USLE model was specifically designed to predict erosion in agricultural lands and low-slope areas (Ganasri, Ramesh 2016). In contrast, RUSLE integrates additional factors such as freeze-thaw and moisture-induced soil erodibility, updated approaches for calculating cover and management factors, adjustments for topography-related changes, and improved conservation strategies (Benavidez et al., 2018). This model estimates soil loss by considering meteorological conditions and watershed characteristics (Singh, 2023; Juliev et al., 2024).

GIS is instrumental in providing spatial data for various parameters such as slope, land use, and soil types, which are crucial inputs for the RUSLE model (Al-hasn et al., 2024). Remote sensing, on the other hand, aids in acquiring real-time data on land cover and vegetation, which can be used to estimate the vegetation cover factor (C) and other essential variables (Makinde, Oyebanji, 2018). Together, GIS and RS enable the creation of precise, spatially explicit models that can predict soil erosion at large scales, offering insights into environmental management and land conservation (Aiello et al., 2015). These tools have proven particularly useful in assessing soil erosion in areas with limited ground data, as they provide a cost-effective and efficient means of monitoring landscape changes over time (Singh et al., 2023; Ji et al., 2024).

RUSLE primarily relies on three key databases: 1) a climate database that provides temperature and precipitation data necessary for

calculating rain-induced erosion; 2) a crop database that contains information about the crops on the land; and 3) a soil database that includes soil properties and survey data to determine the soil erosion resistance coefficient (Kumar et al., 2022). The first database includes the Rainfall Erosivity factor (R), the Soil Erodibility factor (K), and the Topographic factor (LS). The second database covers the Cover Management factor (C), while the third includes the Support Practice factor (P) (Renard, Ferreira, 1993; Amsalu, Mengaw, 2014; Mekonnen et al., 2023). The general equation used in RUSLE is:

$$A = R \times K \times LS \times C \times P \text{ (1997).}$$

Recently, the articles written using bibliometric analysis methods has become increasingly popular in the scientific field (Juliev et al., 2024; Djanpulatova et al., 2025). Because these types of articles allow researchers to easily and quickly analyze large amounts of data in the field (Abdikairov et al., 2024; Hulland, 2024). The main goals of bibliometric analysis include identifying scientific innovations, assessing collaboration between institutions and countries, and understanding trends in academic fields (Krymskaya, 2023; Juliev et al., 2024). In the course of analyzing articles published on the topic of RUSLE, it was discovered that several bibliometric studies had been conducted on this subject. To highlight the difference between previous bibliometric studies and the bibliometric articles we are currently writing, we present Table 1 below.

MATERIALS AND METHODS

Articles published between 1987 and 2024 were downloaded from the Scopus database to study and analyze global research trends based on the RUSLE model. All types of articles published in English during the selected years from the Scopus database (www.scopus.com) were downloaded on September 27, 2024. The search query used was «rusle OR “Revised Universal Soil Loss Equation”» and the fields of science selected were Environmental Science, Earth and Planetary Sciences, and Agricultural and Biological Sciences.

Table 1. A comparison between the current study and previous research

Research	Objective of the research	Results and findings
Ghosal, Das Bhattacharya, 2020	In this paper, researchers attempted to review the soil erosion studies conducted throughout the globe using Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). They searched the SCI, Scopus, Web of Science, Google Scholar database and various theses for this study.	Though RUSLE is the most widely used model for estimation of soil erosion, the factors, namely rainfall erosivity, soil erodibility, slope length and steepness, cover management and conservation practice; vary greatly over different climatic zones, soil properties, slope, land cover and crop phase, respectively. Depending upon those variations, researchers have developed various sets of equation for different factors of RUSLE. These equations can be useful to map soil loss for many places on this planet.

Table 1 continued

Research	Objective of the research	Results and findings
Benavidez et al., 2018	<p>The goal of this paper is to review the Universal Soil Loss Equation (USLE) and its various versions (RUSLE, RUSLE2, and MUSLE), focusing on their sub-factors, strengths, limitations, and adaptations to different local conditions. It aims to provide guidance for researchers working with these models by discussing the uncertainties and limitations of the equations, particularly in relation to climate, spatial resolution, and temporal scales.</p>	<p>The review highlights the various adaptations and applications of the Universal Soil Loss Equation (USLE) and its variants (RUSLE, RUSLE2, MUSLE) across different geoclimatic regions. It identifies the strengths and limitations of each model, particularly in relation to climate types, spatial resolution, and temporal scales. The analysis emphasizes that while (R)USLE is widely used, it has several limitations, such as:</p> <p>Empirical Nature: The models rely on simple empirical formulas, which introduce uncertainty, especially in regions where data quality or availability is inconsistent.</p> <p>Inability to Account for Specific Erosion Types: The models fail to adequately estimate soil loss from gully erosion or mass wasting events, and do not predict sediment yield to streams.</p> <p>Unit Mismatches: Different studies use varying units, which can lead to confusion and errors when applying the model.</p>

Table 1 continued

Research	Objective of the research	Results and findings
Kumar et al., 2022	The purpose of the article is to evaluate the performance of the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) model in various global conditions. The article examines how the RUSLE model performs under different topographic and climatic conditions and aims to identify the most suitable conditions for its reliable application.	Despite its widespread use, the RUSLE model has limitations and challenges, particularly in large and unmeasured areas due to the lack of availability and quality of the necessary data. The paper found that further research is needed to assess when the model works well and where it falls short.
Negese, 2024	The objective of this review is to examine the remote sensing methods utilized and identify the critical aspects that have been overlooked in previous studies in Ethiopia when estimating the RUSLE C-factor value using remote sensing techniques. Specifically, it focuses on the use of uniform C-factor values derived from literature after classifying remote sensing imagery into various land use and land cover categories, as well as the application of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), both of which are widely employed approaches in Ethiopian studies for estimating the RUSLE C-factor.	The study identified several critical oversights in previous RUSLE-based studies in Ethiopia, which may lead to inaccurate soil loss predictions. These included: Inadequate consideration of the seasonal variation of cover and management factors (91.89%). Underestimation of the effect of management practices (89.19%). Underestimation of the spatial variation of cover and management factors (81.08%). Inadequate consideration of the impact of vegetation and crop canopy cover on soil erosion (76.67%).

Table 1 continued

Research	Objective of the research	Results and findings
Ezech et al., 2024	The article aims to review and analyze the application of the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) model in soil erosion studies, with a specific emphasis on Nigeria. For this analysis, the researchers examined approximately 50 articles from Google Scholar and 4 articles from the ScienceDirect database.	The results from various studies across Nigeria showed notable differences, which were attributed to the varying methods used to estimate key factors in the RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation) model. Based on these findings, the study recommends that the Ministries of Agriculture and Environment prioritize soil erosion research by adopting proactive soil conservation and management strategies. The use of ensemble models, including machine learning approaches, is suggested rather than relying solely on structural interventions. Additionally, the study advocates for a harmonized look-up table for the cover management factor and conservation practices factor, ensuring they fairly represent the different eco-climatic regions. The study also highlights the limitations of the model and proposes a way forward for improving its application.

Table 1 continued

Research	Objective of the research	Results and findings
Phinzi, Ngetar, 2019	The purpose of this paper is to provide an overview of recent developments in the use of geospatial technologies, such as Geographic Information Systems (GIS) and remote sensing, for deriving the individual factors involved in the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE).	Advancements in Geospatial Technologies: Recent developments in geospatial technologies, particularly GIS and remote sensing, have significantly enhanced the ability to derive the individual factors used in the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE).
Aleweli et al., 2019	The aim of this paper is to analyze and evaluate the most commonly used USLE-type models for soil erosion modeling, applied in 109 countries over the past 80 years. It focuses on understanding their effectiveness and identifying key areas for improvement.	The study highlights four key areas for future research: (i) addressing the difference between modeled and measured erosion rates, (ii) using high-resolution remote sensing data for large-scale models, (iii) improving measurement and monitoring programs, and (iv) conducting thorough uncertainty assessments in soil erosion modeling.

Table 1 continued

Research	Objective of the research	Results and findings
Present research	Unlike the previous articles, this manuscript studies 620 English-language papers published globally in Scopus database from 1987 to 2024, specifically focusing on the RUSLE topic. This analysis does not include other models with USLE-type algorithms, such as WaTEM/SEDEM.	Based on the results of the bibliometric analysis, there was a significant rise in the number of articles on the topic of RUSLE compared to previous years. China and India emerged as the leaders in terms of publication output. Among the journals, <i>Environmental Earth Sciences</i> published the highest number of articles on this subject, ranking first in the field. As for the authors, Renard K.G. and Li Y. were identified as the most active contributors. Regarding keywords, “Soil Erosion” was the most frequently occurring term.

A total of 620 articles were retrieved from the database based on the entered search criteria. These articles were then analyzed using Biblioshiny, MapChart.net, and VOSviewer according to several categories, including years, journals, authors, keywords, countries, affiliations, most cited articles, trend topics, and mixed analysis. Table 2 presents details about the research methodology.

Table 2. Research design and workflow

Filters	Results
Database	Scopus
Searching query	TITLE (rusle OR “Revised universal soil loss equation”)
Acquisition date	September 27, 2024
Time period	1987–2024
Categories	Environmental Science, Earth and Planetary Sciences, Agricultural and Biological Sciences
Sources	All type of article types
Language	English
Number of publications	620

RESULTS AND DISCUSSION

Figure 1 illustrates the trend of published articles related to the RUSLE model over the years under consideration. As shown in the chart, the years can be divided into three distinct periods: the years with the fewest articles, the average years, and the most productive years.

In the first period, from 1987 to 1996, the number of articles was the lowest, ranging from 1 to 3 per year. This low figure can be attributed to the lack of technological advancements during these early years. Articles published during this period made up only 2% of the total articles. The articles published during these years primarily fo-

cused on the outcomes of scientific efforts aimed at enhancing the RUSLE model through various methods. For instance, in a 1994 study by Benkobi, an improved surface cover subfactor (RSC) of the revised universal soil loss equation (RUSLE) was assessed to better predict soil erosion from pastures. The findings revealed that the RUSLE model, with the RSC, delivered more accurate land loss estimates compared to the original RUSLE model, although it still underestimated the actual land loss (Benkobi et al., 1994). A similar follow-up article from this period discusses the new RUSLE model, which is designed to model land changes and water quality, as well as the data that will be input into this model (Renard, Ferreira, 1993).

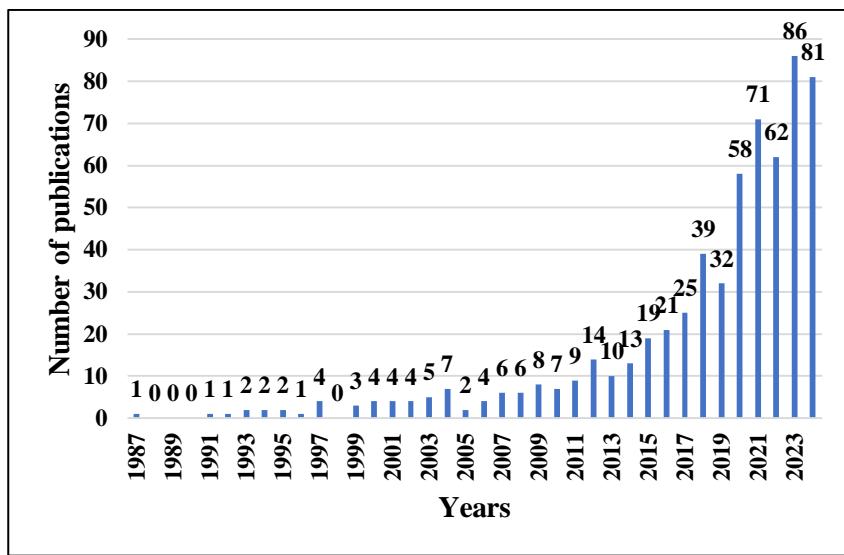


Fig. 1. Trend of published papers with RUSLE model.

The second period, spanning from 1997 to 2014, was much more productive, with the number of articles rising from 4 to 14 per year. This marked a significant increase in research output. During this period, articles on the topic of RUSLE began to highlight work done using modern technologies like GIS and RS. For instance, in 2004, a study by

Shi in China aimed to develop an updated RUSLE model using GIS to mitigate soil erosion. As a result, the RUSLE-GIS model proved to be an effective tool for resource management and soil conservation (Shi et al., 2004). In addition, research papers have been published that calculate annual soil loss using the RUSLE model in watersheds (Kouli et al., 2009).

The final period, covering the years from 2015 onward, stands out as the most productive phase. A sharp increase in the number of publications was observed, especially in 2023, when the number of articles reached an all-time high of 86. This period accounted for over 80% of the total articles published. In recent years, the RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation) model has been widely used in different regions (Al Shoumik et al., 2023; Wang et al., 2023), including river basins situated in mountainous areas (Thomas et al., 2018; Das et al., 2020). Additionally, it has been applied alongside various climate models to assess soil erosion under different environmental conditions and changing climate scenarios (Getachew et al., 2021). This combination helps to improve the accuracy of predictions regarding soil erosion and better understand how factors like rainfall, vegetation, and land slope contribute to soil loss in these areas (Teng et al., 2018; Pal, Chakrabortty, 2019). In addition to the modern technologies and models mentioned above, Google Earth Engine (Jodhani et al., 2023; Aldiansyah, Wardani, 2024) is also being used to estimate annual soil loss during this period.

Several factors contribute to this surge in publications in recent years. The rapid integration of modern technologies across various sectors, including agriculture, and the growing global focus on addressing soil erosion, driven by international organizations, have played key roles in the increasing interest and research on the RUSLE model.

Analysis of Journals

The third table presents the names of the 10 journals that published the most articles on the RUSLE topic during the review period, along with their respective H-indexes. As shown in the Table 3, *Environmental Earth Sciences* and *Modeling Earth Systems and Environment* lead the list, with H-indexes of 15 and 14, respectively, publishing 30 and 28 articles. The journal *Catena* ranks third with 19 articles,

while the *Journal of Soil and Water Conservation* completes the top ten with 10 articles. The journal that ranked first in terms of the number of articles published, published more articles on the topic of RUSLE primarily towards the end of the years (Islam et al., 2024; Nizar et al., 2024; Oudchaire et al., 2024) covered. This journal is a hybrid type of journal, publishing 24 issues per year.

Figure 2 below illustrates the increasing trend in the number of articles published in the five journals that contributed the most on the selected topic during the review period. As shown in the diagram, *Catena* was the first journal to publish articles on this subject, with the first RUSLE article appearing in 1998. The number of articles in this journal has steadily increased over the years. Almost a decade later, in 2007, *Environmental and Assessment* joined the list by publishing its first article on RUSLE, initially showing slow growth, followed by a more significant increase. *Environmental Earth Sciences*, added third in 2009, began publishing articles at a rapid pace, ultimately achieving the best results in this trend. The most recent addition, *Modeling Earth Systems and Environment* (2014), ranked second in terms of growth.

Analysis of Authors

The authors of an article are considered key contributors to their field because they are the ones who share the results of scientific and practical work with the broader public. A total of 159 authors contributed to the publication of articles on the RUSLE model. Figure 3 highlights the scientists who have published the most articles on this topic. Among them, Renard K.G. and Li Y. stand out as the top contributors, each publishing seven articles on the RUSLE topic. Renard K.G. has been the first author of nearly all of his articles and has been publishing research on the RUSLE topic since 1991 (Renard et al., 1991, 1994, 2011; Renard, Ferreira, 1993). Li Y. has been a co-author in nearly 80% of these seven articles and started participating in papers related to the RUSLE topic from 2015 onwards (Tang et al., 2015; Zeng et al., 2017; Paul et al., 2021). The other authors in the top ten have all made significant contributions, each publishing five articles.

Table 3. Top ten journals with publications about RUSLE model in the period of 1987 to 2024

Sources	Category	Number of publications	H-index
Environmental Earth Sciences	Agricultural and Biological science	30	15
Modeling Earth Systems and Environment	Agricultural and Biological science	28	14
Catena	Earth and Planetary sciences	19	14
Arabian Journal Of Geosciences	Environmental science	16	12
Environmental Monitoring And Assessment	Environmental science	14	8
International Soil and Water Conservation Research	Agricultural and Biological science	12	10
Iop Conference Series Earth and Environmental Science	Earth and Planetary sciences	12	3
Sustainability Switzerland	Environmental science	12	7
Water Switzerland	Environmental science	11	7
Journal Of Soil and Water Conservation	Agricultural and Biological science	10	8

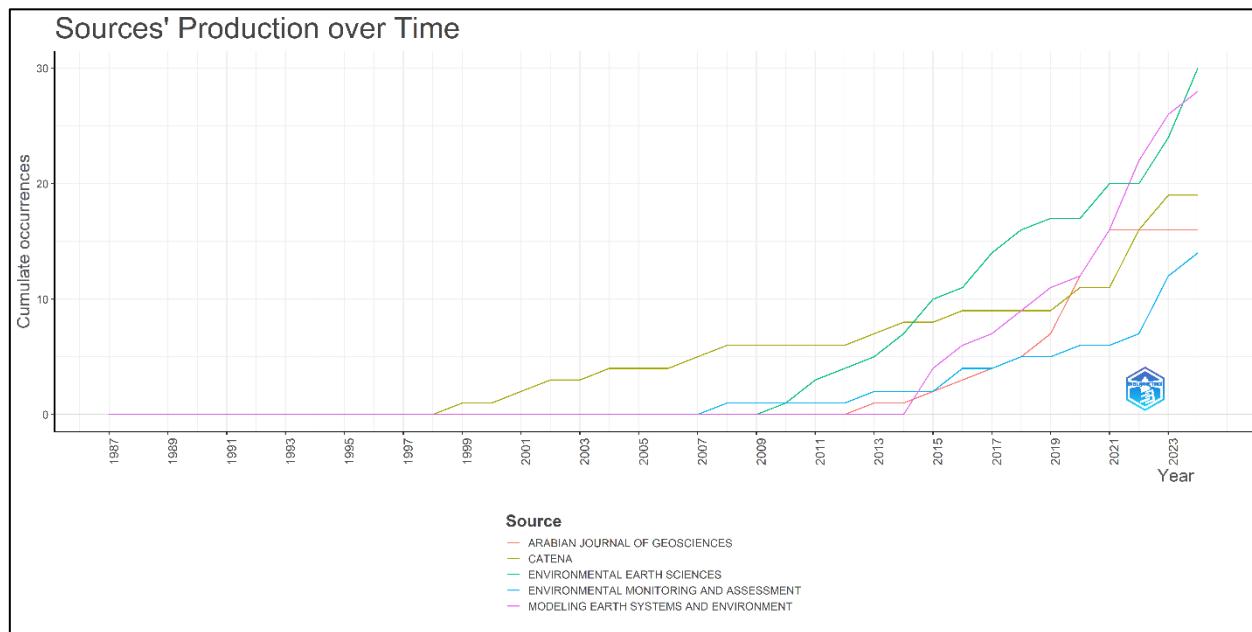


Fig. 2. Growth trend of journal sources publishing articles on the topic of the RUSLE model from 1987 to 2024.

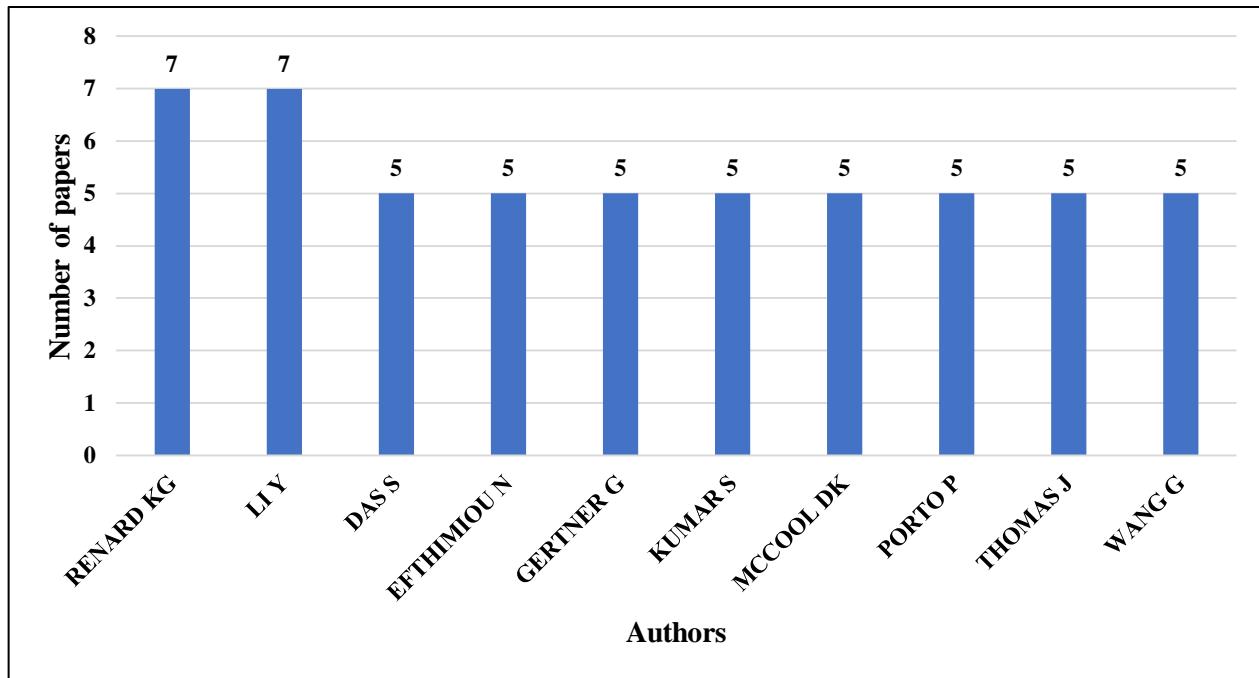


Fig. 3. Top ten authors who have published the most articles on the RUSLE model.

Keyword Analysis

Figure 4 shows the fifty most frequently used keywords in articles published on the topic of RUSLE worldwide between 1987 and 2024. The keyword size in this graph tells you how often that keyword is used. As you can see from the picture, the most important keyword in the topic being studied is “soil erosion”.

To help the reader understand the keywords more clearly and make it easier to retrieve information, Figure 5 shows the tree plot of top-30 author-keywords in specific numbers. The RUSLE documents utilized the author-keyword is “soil erosion”. This word appeared as an author-keyword 484 times and have 14% contribution in the top 30 author-keywords. The next most common author-keywords were “revised universal soil loss equation” and “erosion” with 270 and 218 occurrences, respectively. The author-keywords reveal that RUSLE is predominantly utilized for soil erosion modeling. The keyword “soils” was also used as an author-keyword 189 times in articles published within the scope of the topic under study, ranking fourth.

Analysis of the top Countries and Affiliations

A map of the countries that published the most articles on the topic (Fig .6) was created using map chart.com. In the list of the top ten countries, China ranks first with 235 articles. There are several reasons for this. In China, economic and population growth are impacting the environment and land use, leading to serious issues such as soil erosion (Lai et al., 2024). Additionally, some regions (Chinese Loess Plateau) of this country are facing some of the most severe soil erosion in the world (Tang et al., 2015). India also has a significantly higher number of articles on RUSLE than the other eight countries, and is second in the top ten after China with 219 articles. There are enough reasons to pay serious attention to the issue of soil erosion in India, such as climate (Masroor et al., 2022; Nizar et al., 2024), flash floods caused by cloudbursts (Singh, Kansal, 2023) and the main reason is that India, about 53% of its total land area, is prone to erosion and loses about 5 334 metric tons of soil every year (Pandey et al., 2023). The USA is third with 129 articles and Ethiopia is fourth with 88 articles. Turkey rounded out the top ten countries in terms of publishing articles on the topic under consideration with 38 articles.

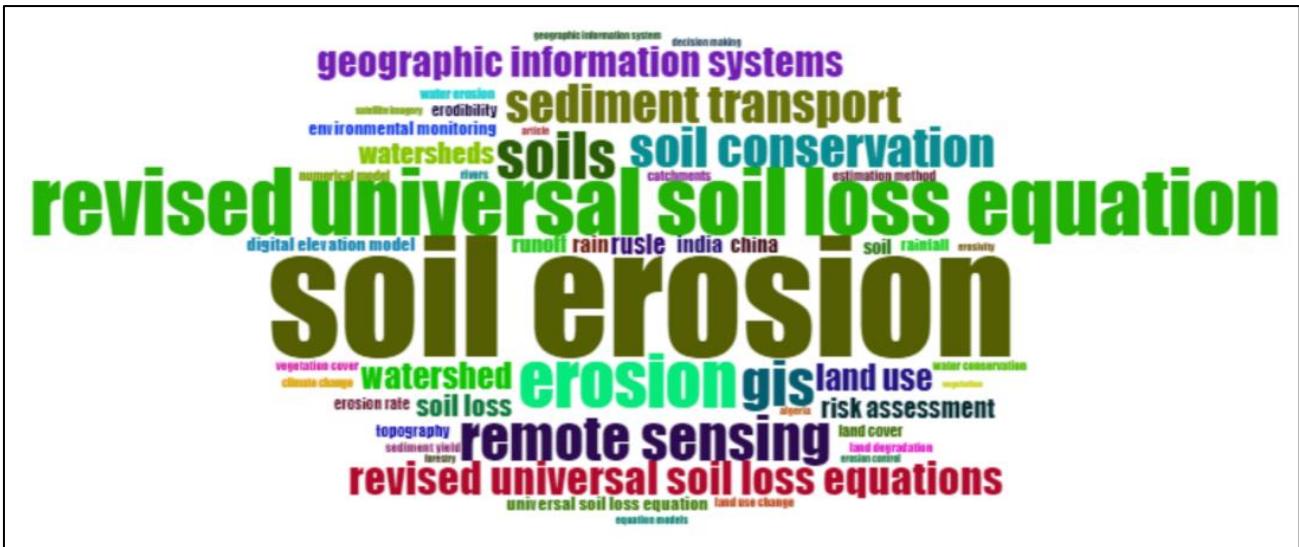


Fig. 4. Word cloud of RUSLE model.

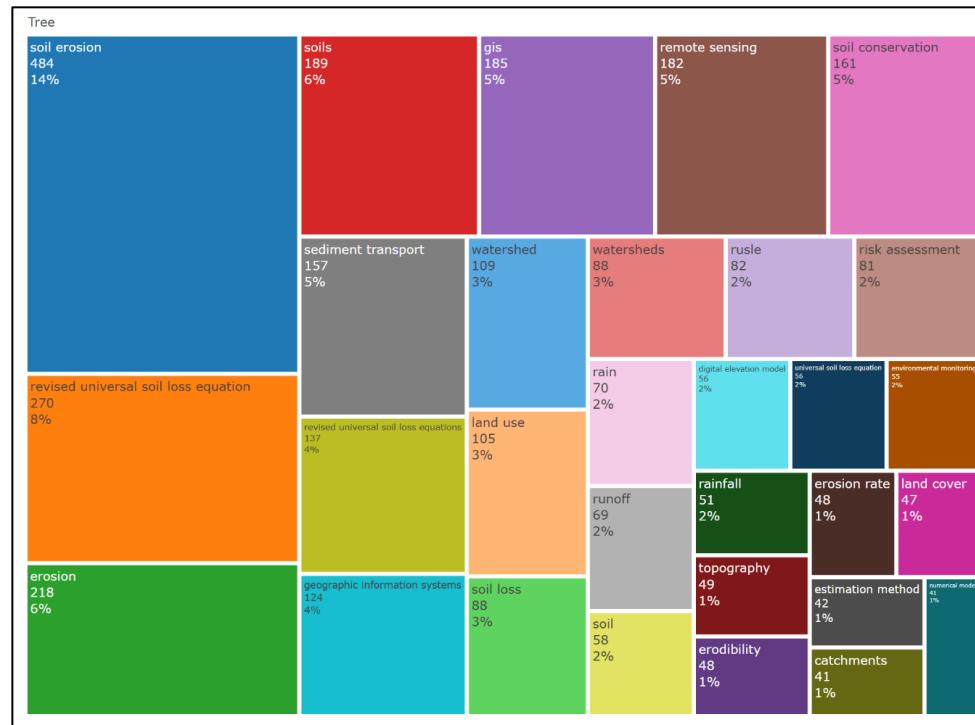


Fig. 5. Tree plot of top-30 author-keywords in the RUSLE topic in numbers and percentages.

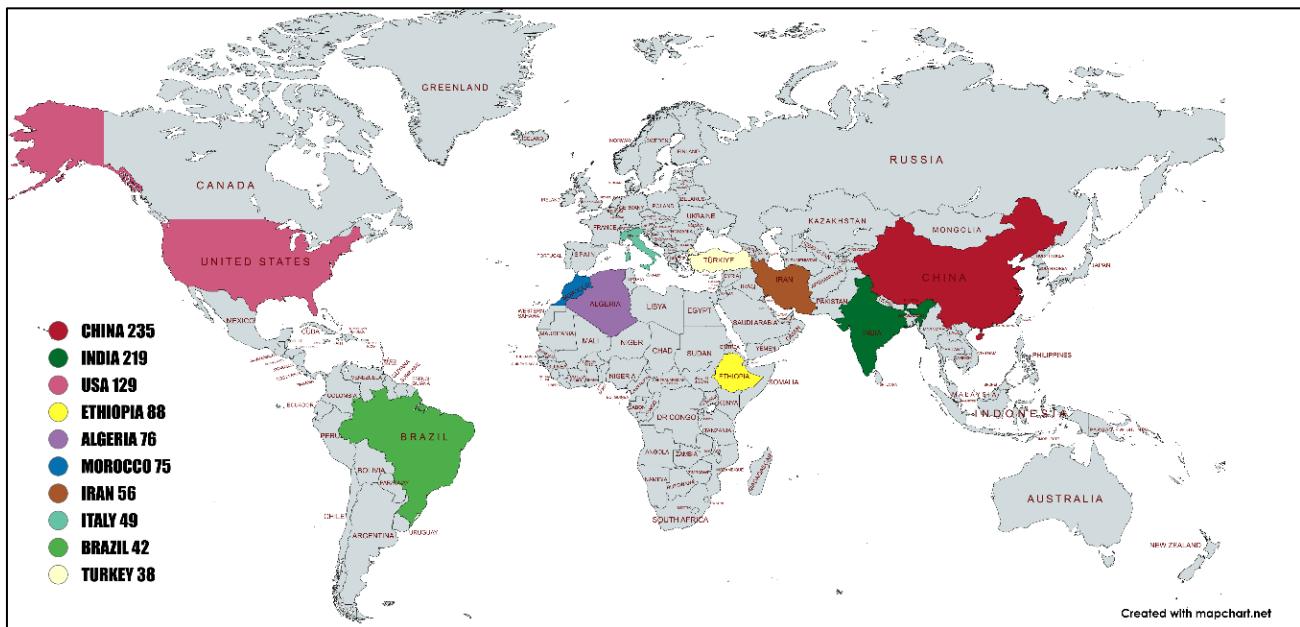


Fig. 6. List of top countries on RUSLE articles.

The following graph (Fig. 7) shows the institutions that participated in publishing the most articles on the 7 RUSLE topics. Along with the top countries, this graphic shows that two Chinese institutes have the most publications. They are: Chinese Academy of Sciences and University of Chinese Academy of Sciences. Both of these institutions have published 12 articles each. The Chinese Academy of Sciences is a place that brings together engineers and scientists from China and around the world to solve theoretical and practical problems. The developments created at this academy should serve the interests of China and countries around the world. In the next third and fourth places are Bahir Dar and Debre Tabor universities in Ethiopia with 9 articles each.

Analysis of the most cited documents, countries and year

More specifically, a citation is a brief alphanumeric phrase that is included into the body of an intellectual work and indicates an entry in the work's bibliographic (Colavizza et al., 2020). Table 4 shows the names of the most cited articles on the topic of RUSLE. Renard K.G.'s article "RUSLE: Revised Universal Soil Loss Equation" published in the Journal of Soil & Water Conservation in 1991 had the greatest citation rate during the review period, with 1,239 citations.

Figure 8 lists the most cited countries. India leads all countries with 3,609 citations to its articles. China is second only to India in this indicator with 2,540 citations. The next 9th Figure shows which year the articles on the topic of RUSLE received the most citations. The articles on the topic under consideration received the most citations in the period from 1987 to 1992. In the remaining years, the number of citations given to articles has experienced a fluctuating trend of around 5.

Analysis of the trend topics in the RUSLE model articles.

Typically, the selection of a topic for a research paper focuses on the nature of the work being conducted and the methodology used in the topic. Figure 10 shows the trend of change in trend topics over the years selected for review in RUSLE-related articles. Terms such as "revised universal soil", "soil loss equation", and "universal soil loss" are among the most used topics in 2018.

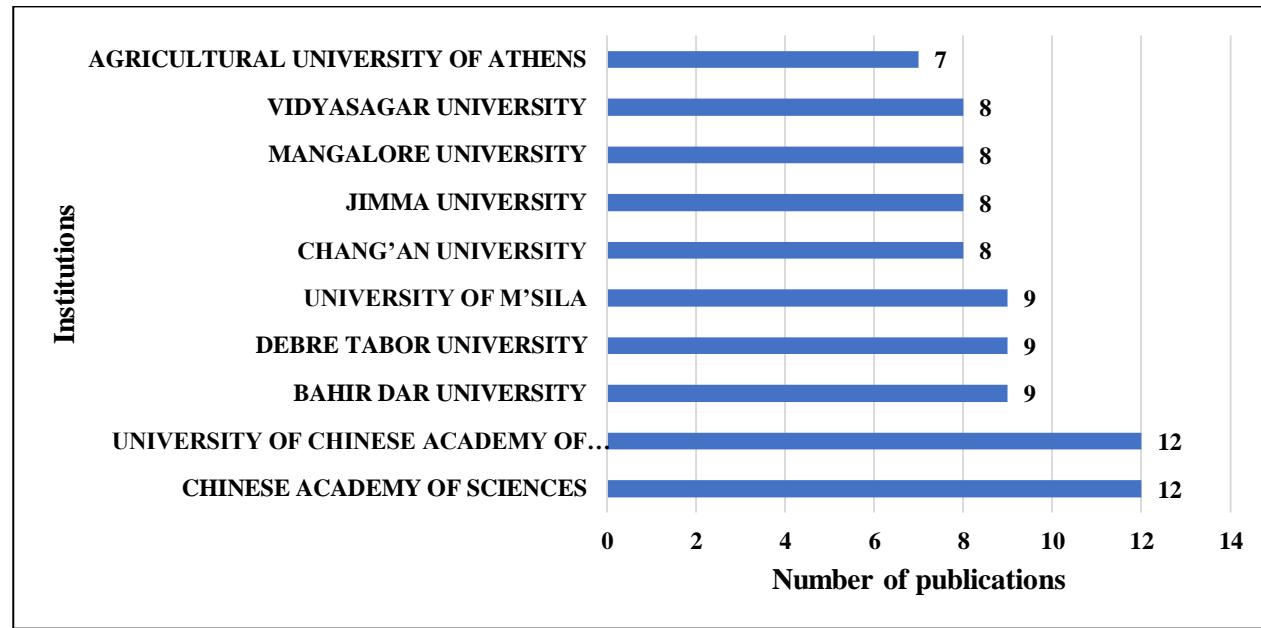


Fig. 7. Most relevant institutions on the topic of RUSLE model.

Table 4. Most global cited documents on the RUSLE topic

Paper	DOI	Total Citations	TC per Year
RENARD K.G., 1991, JOURNAL OF SOIL & WATER CONSERVATION		1239	36,44
GANASRI B.P., 2016, GEOSCI FRONT	10.1016/j.gsf.2015.10.007	604	67,11
MOORE I.D., 1992, JOURNAL OF SOIL & WATER CONSERVATION		541	16,39
PRASANNAKUMAR V., 2012, GEOSCI FRONT	10.1016/j.gsf.2011.11.003	418	32,15
MILLWARD A.A., 1999, CATENA	10.1016/S0341-8162(99)00067-3	367	14,11
ANGIMA S.D., 2003, AGRIC ECOSYST ENVIRON	10.1016/S0167-8809(03)00011-2	357	16,22
KOULI M., 2009, ENVIRON GEOL	10.1007/s00254-008-1318-9	351	21,9
FU B.J., 2005, LAND DEGRAD DEV	10.1002/lqr.646	335	16,75
BENAVIDEZ R., 2018, HYDROL EARTH SYST SCI	10.5194/hess-22-6059-2018	306	43,71
LU D., 2004, LAND DEGRAD DEV	10.1002/lqr.634	297	14,14

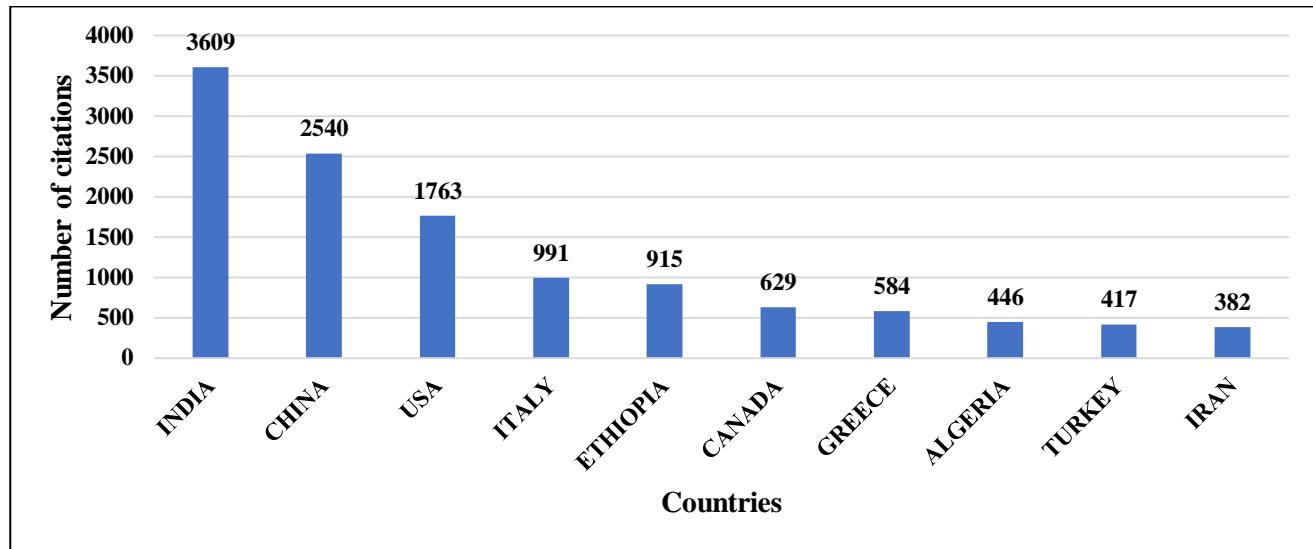


Fig. 8. Countries with the most cited articles on RUSLE.

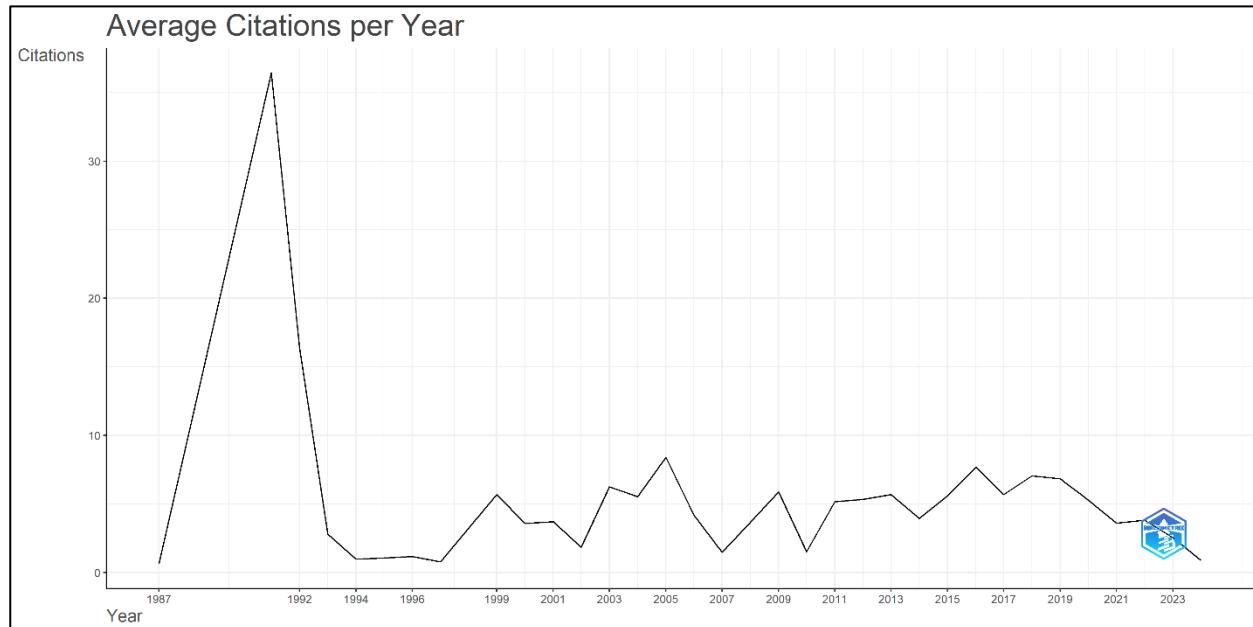


Fig. 9. The year in which articles on the topic of RUSLE received the most citations.

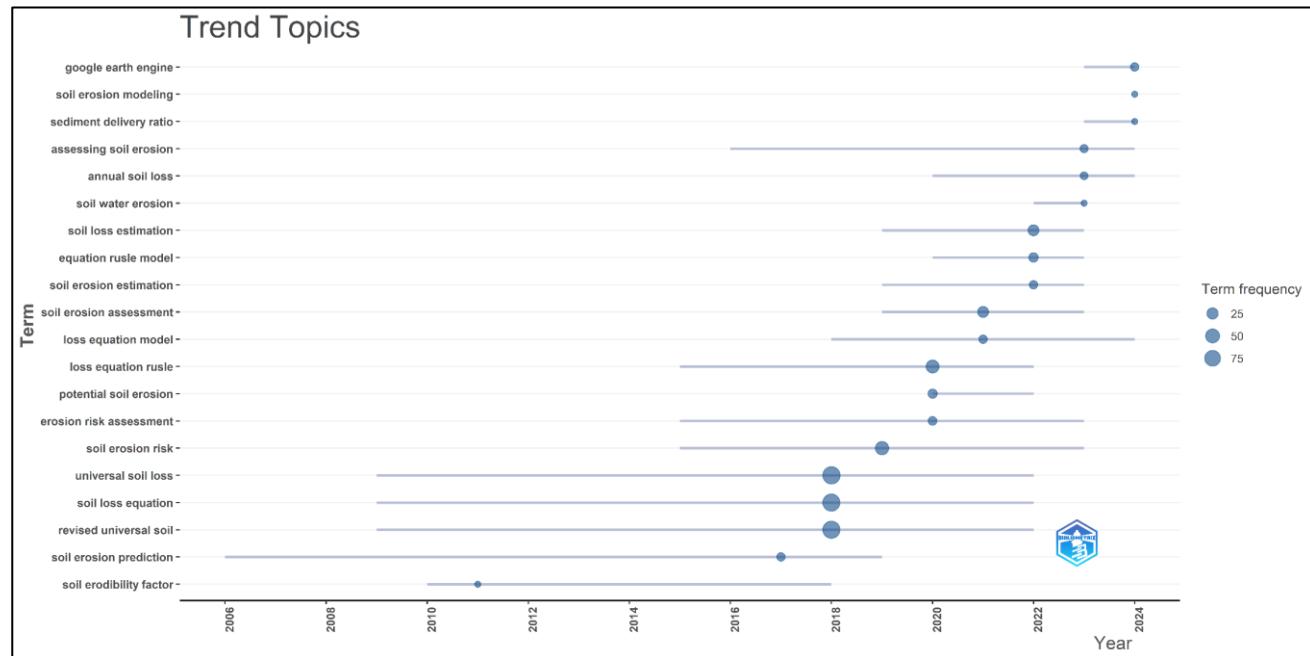


Fig. 10. Trend topics.

In recent years, between 2019 and 2020, the term “soil erosion risk” has become a trend. In recent years, terms related to modern technologies such as model, modeling, and Google Earth Engine have been added to the list of trending topics. This indicates the increased involvement of modern technologies in the subject under consideration.

CONCLUSIONS

This bibliometric analysis provides a comprehensive overview of global research on soil erosion modeling using the RUSLE model. It highlights 2023 as a key year with a significant increase in publications, driven by influential journals like *Environmental Earth Sciences* and *Modeling Earth Systems and Environment*. Leading authors, such as Renard K.G. and Li Y., have made substantial contributions to the field, and the frequent use of the term “soil erosion” reflects global concerns, particularly in countries like China and India where soil erosion is a critical issue.

The analysis identifies three key periods in the evolution of RUSLE research. The first period (1987–1996) had limited output due to technological constraints. The second period (1997–2014) saw a rise in publications with the integration of GIS and remote sensing. The third period (2015 – till now) marks the most productive phase, driven by advances in technology and heightened global awareness, particularly in 2023.

Modern technologies, such as GIS and remote sensing, have significantly enhanced soil erosion research by providing more accurate and scalable solutions for modeling and predicting erosion patterns. These tools support better environmental management and land conservation strategies. Overall, this analysis offers valuable insights for future research and provides a foundation for developing targeted strategies to combat land degradation and promote sustainable agricultural practices worldwide.

REFERENCES

1. Abdelsamie E.A., Abdellatif M.A., Hassan F.O., El Baroudy A.A., Mohamed E.S., Kucher D.E., Shokr M.S., Integration of RUSLE Model, Remote Sensing and GIS Techniques for Assessing Soil Erosion Hazards in Arid Zones, *Agriculture*, 2022, Vol. 13, No. 1, 35.

2. Abdi B., Kolo K., Shahabi H., Soil erosion and degradation assessment integrating multi-parametric methods of RUSLE model, RS, and GIS in the Shaqlawa agricultural area, Kurdistan Region, *Iraq. Environ. Monit. Assess.*, 2023, 195, 1149.
3. Abdikairov B., Juliev M., Kholmurodova M., Analyses and assessment of soil salinity modeling: review of papers from Scopus database, *J. Geol. Geogr. Geoecology*, 2024, No. 33, pp. 647–661.
4. Aiello A., Adamo M., Canora F., Remote sensing and GIS to assess soil erosion with RUSLE3D and USPED at river basin scale in southern Italy, *CATENA*, 2015, Vol. 131, pp. 174–185.
5. Al Shoumik B.A., Khan Md.Z., Islam Md.S., Soil erosion estimation by RUSLE model using GIS and remote sensing techniques: A case study of the tertiary hilly regions in Bangladesh from 2017 to 2021, *Environ. Monit. Assess.*, 2023, Vol. 195, 1096.
6. Aldiansyah S., Wardani F., Spatiotemporal dynamic of soil erosion in the Roraya River Basin based on RUSLE model and Google Earth Engine, *J. Hydroinformatics*, 2024, Vol. 26, pp. 1273–1294.
7. Alewell C., Borrelli P., Meusburger K., Panagos P., Using the USLE: Chances, challenges and limitations of soil erosion modelling, *Int. Soil Water Conserv. Res.*, 2019, Vol. 7, pp. 203–225.
8. Al-hasn R., Alghamaz F., Dikkeh M., Idriss Y., Water soil erosion modeling with RUSLE, GIS & remote sensing: A case study of the AL-Sanaoubar River basin (Syria), *J. Saudi Soc. Agric. Sci.*, 2024, pp. 474–484.
9. Amsalu T., Mengaw A., GIS Based Soil Loss Estimation Using RUSLE Model: The Case of Jabi Tehinan Woreda, ANRS, *Ethiopia. Nat. Resour.*, 2014, Vol. 05, pp. 616–626.
10. Benavidez R., Jackson B., Maxwell D., Norton K., A review of the (Revised) Universal Soil Loss Equation ((R)USLE): With a view to increasing its global applicability and improving soil loss estimates, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2018a, Vol. 22, pp. 6059–6086.
11. Benavidez R., Jackson B., Maxwell D., Norton K., A review of the (Revised) Universal Soil Loss Equation (R/USLE): with a view to increasing its global applicability and improving soil loss estimates, *Hydrology and Earth System Sciences*, 2018b, Vol. 22, Iss. 11, pp. 6059–6086.
12. Benkobi L., Trlica M.J., Smith J.L., Evaluation of a Refined Surface Cover Subfactor for Use in RUSLE, *J. Range Manag.*, 1994, Vol. 47, 74.
13. Bensekhria A., Bouhata R., Assessment and Mapping Soil Water Erosion Using RUSLE Approach and GIS Tools: Case of Oued el-Hai Watershed, Aurès West, Northeastern of Algeria, *ISPRS Int. J. Geo-Inf.*, 2022, Vol. 11, Article 84, DOI: <https://doi.org/10.3390/ijgi11020084>.
14. Borrelli P., Alewell C., Alvarez P., Anache J.A.A., Baartman J.,

- Ballabio C., Bezak N., Biddoccu M., Cerdà A., Chalise D., Chen S., Chen W., De Girolamo A.M., Gessesse G.D., Deumlich D., Diodato N., Efthimiou N., Erpul G., Fiener P., Freppaz M., Gentile F., Gericke A., Haregeweyn N., Hu B., Jeanneau A., Kaffas K., Kiani-Harchegani M., Villuendas I.L., Li C., Lombardo L., López-Vicente M., Lucas-Borja M.E., Märker M., Matthews F., Miao C., Mikoš M., Modugno S., Möller M., Naipal V., Nearing M., Owusu S., Panday D., Patault E., Patriche C.V., Poggio L., Portes R., Quijano L., Rahdari M.R., Renima M., Ricci G.F., Rodrigo-Comino J., Saia S., Samani A.N., Schillaci C., Syrris V., Kim H.S., Spinola D.N., Oliveira P.T., Teng H., Thapa R., Vantas K., Vieira D., Yang J.E., Yin S., Zema D.A., Zhao G., Panagos P., Soil erosion modelling: A global review and statistical analysis, *Sci. Total Environ.*, 2021, Vol. 780, 146494.
15. Borrelli P., Robinson D.A., Fleischer L.R., Lugato E., Ballabio C., Alewell C., Meusburger K., Modugno S., Schütt B., Ferro V., Bagarello V., Oost K.V., Montanarella L., Panagos P., An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion, *Nat. Commun.*, 2017, Vol. 8, 2013.
16. Colavizza G., Hrynaszkiewicz I., Staden I., Whitaker K., McGillivray B., The citation advantage of linking publications to research data, *PLOS ONE*, 2020, Vol. 15, e0230416.
17. Das S., Deb P., Bora P.K., Katre P., Comparison of RUSLE and MMF Soil Loss Models and Evaluation of Catchment Scale Best Management Practices for a Mountainous Watershed in India, *Sustainability*, 2020, Vol. 13, 232.
18. Djanpulatova Z.A., Juliev M.K., Abdikairov B.E., Kholmurodova M.D., Turdalieva S.R., Khadjieva Z.B., Ecosystem services in achieving sdgs: a bibliometric overview 2015-2024, *Appl. Ecol. Environ. Res.*, 2025, Vol. 23, pp. 6223–6246.
19. Ezeh C.U., Igwe O., Asare M.Y., Ndulue D.C., Ayadiuno R.U., Preko K., A review of soil erosion modeling in Nigeria using the Revised Universal Soil Loss Equation model, *Agrosystems Geosci. Environ.*, 2024, Vol. 7, e20471.
20. Ganashri B.P., Ramesh H., Assessment of soil erosion by RUSLE model using remote sensing and GIS – A case study of Nethravathi Basin, *Geosci. Front.*, 2016, Vol. 7, pp. 953–961.
21. Getachew B., Manjunatha B.R., Bhat G.H., Assessing current and projected soil loss under changing land use and climate using RUSLE with Remote sensing and GIS in the Lake Tana Basin, Upper Blue Nile River Basin, Ethiopia, *Egypt. J. Remote Sens. Space Sci.*, 2021, Vol. 24, pp. 907–918.
22. Ghosal K., Das Bhattacharya S., A Review of RUSLE Model, *J. Indian Soc. Remote Sens.*, 2020a, Vol. 48, pp. 689–707.
23. Hulland J., Bibliometric reviews – some guidelines, *J. Acad. Mark. Sci.*,

2024, Vol. 52, pp. 935–938.

24. Islam Md.R., Imran H.M., Islam Md.R., Saha G.C., A RUSLE-based comprehensive strategy to assess soil erosion in a riverine country, Bangladesh, *Environ. Earth Sci.*, 2024, Vol. 83, 162.
25. Ji C., Cao Y., Li X., Pei X., Sun B., Yang X., Zhou W., A review of the satellite remote sensing techniques for assessment of runoff and sediment in soil erosion, *J. Hydrol. Hydromech.*, 2024, Vol. 72, pp. 252–267.
26. Jodhani K.H., Patel D., Madhavan N., Singh S.K., Soil Erosion Assessment by RUSLE, Google Earth Engine, and Geospatial Techniques over Rel River Watershed, Gujarat, India, *Water Conserv. Sci. Eng.*, 2023, Vol. 8, Article 49, DOI: <https://doi.org/10.1007/s41101-023-00223-x>.
27. Juliev M., Abdikairov B., Kholmurodova M., Djanpulatova Z., Mingboyeva M., Makhmudova M., Mapping the Landscape: A Bibliometric Analysis of Digital Education Research, *E3S Web Conf.*, 2024, Vol. 590, 03009.
28. Juliev M., Kholmurodova M., Abdikairov B., Abduwaili J., A comprehensive review of soil erosion research in Central Asian countries (1993–2022) based on the Scopus database, *Soil Water Res.*, 2024, Vol. 19(4), pp. 244–256, DOI: <https://doi.org/10.17221/82/2024-SWR>.
29. Juliev M., Kholmurodova M., Gafurova L., Khoshjanova K., Khomidov A., Agzamova I., Normatova N., Gulyamov G., Muratova M., Gulamkadirova M., Modeling of soil erosion based on geospatial techniques and the RUSLE model for the Ugam Chatkal National Park, Uzbekistan, *J. Geol. Geogr. Geoecology*, 2024, Vol. 33, pp. 485–494.
30. Kouli M., Soupios P., Vallianatos F., Soil erosion prediction using the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) in a GIS framework, Chania, Northwestern Crete, Greece, *Environ. Geol.*, 2009, Vol. 57, pp. 483–497.
31. Krymskaya A.S., The Bibliometrics of Bibliometrics as a New Area of Research, *Sci. Tech. Inf. Process.*, 2023, Vol. 50, pp. 286–291.
32. Kumar M., Sahu A.P., Sahoo N., Dash S.S., Raul S.K., Panigrahi B., Global-scale application of the RUSLE model: a comprehensive review, *Hydrol. Sci. J.*, 2022a, Vol. 67, pp. 806–830.
33. Lai J., Li J., Liu L., Predicting Soil Erosion Using RUSLE and GeoSOS-FLUS Models: A Case Study in Kunming, China, *Forests*, 2024, Vol. 15, 1039.
34. Makinde E.O., Oyebanji E.I., The Application of Remote Sensing and GIS Technology to Erosion Risk Mapping, *Econ. Sustain. Dev. Energy Int. Conf.*, 2018, 1398.
35. Masroor M., Sajjad H., Rehman S., Singh R., Hibjur Rahaman M., Sahana M., Ahmed R., Avtar R., Analysing the relationship between drought and soil erosion using vegetation health index and RUSLE models in Godavari

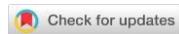
- middle sub-basin, India, *Geosci. Front.*, 2022, Vol. 13(2), Article 101312, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2021.101312>.
36. Mekonnen E., Kebede A., Asfaw S., Feyissa S., Optimizing soil erosion estimates of RUSLE model by analyzing land use/cover dynamics in upper Awash River Basin, Central Ethiopia, *Geomat. Nat. Hazards Risk*, 2023, Vol. 14(1), Article 2257363, DOI: <https://doi.org/10.1080/19475705.2023.2257363>.
37. Negese A., Critical oversights of remote sensing-based RUSLE cover and management (C) factor estimation in Ethiopia: A review, *Remote Sens. Appl. Soc. Environ.*, 2024, Vol. 33, 101089.
38. Nizar A., Badimela U., Manohar C., Kamaraj J., Ganugapenta S., Nadimikeri J., Krishnan A., Assessment of soil erosion by integrating RUSLE-SDR-TLA model in Cauvery River basin, India, *Environ. Earth Sci.*, 2024, Vol. 83, 549.
39. Oudchaira S., Rhoujjati A., Hanich L., EL Hachimi M.L., Evaluating soil loss and sediment yield for sustainable management of the Hassan II dam within Morocco's Upper Moulouya watershed using RUSLE model and GIS, *Environ. Earth Sci.*, 2024, Vol. 83, Article 210, DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-024-11518-0>.
40. Pal S.C., Chakrabortty R., Simulating the impact of climate change on soil erosion in sub-tropical monsoon dominated watershed based on RUSLE, SCS runoff and MIROC5 climatic model, *Adv. Space Res.*, 2019, Vol. 64, pp. 352–377.
41. Pandey H.K., Singh V.K., Singh R.P., Singh S.K., Soil Loss Estimation Using RUSLE in Hard Rock Terrain: a Case Study of Bundelkhand, India, *Water Conserv. Sci. Eng.*, 2023, Vol. 8, 55.
42. Papaiordanidis S., Gitas I., Katagis T., Soil erosion prediction using the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) in Google Earth Engine (GEE) cloud-based platform, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2019, Vol. 100, pp. 36–52, DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2019-100-36-52>.
43. Paul S.S., Li J., Li Y., Shen L., Assessing land use–land cover change and soil erosion potential using a combined approach through remote sensing, RUSLE and random forest algorithm, *Geocarto Int.*, 2021, Vol. 36, pp. 361–375.
44. Pennock D.J., Soil erosion: the greatest challenge for sustainable soil management. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2019.
45. Phinzi K., Ngetar N.S., The assessment of water-borne erosion at catchment level using GIS-based RUSLE and remote sensing: A review, *Int. Soil Water Conserv. Res.*, 2019, Vol. 7, pp. 27–46.
46. Renard K.G., Ferreira V.A., RUSLE model description and database

- sensitivity, *J. Environ. Qual.*, 1993, Vol. 22, pp. 458–466.
47. Renard K.G., Foster G.R., Weesies G.A., Porter J.P., RUSLE: revised universal soil loss equation, *J. Soil Water Conserv.*, 1991, Vol. 46, pp. 30–33.
48. Renard K.G., Foster G.R., Yoder D.C., McCool D.K., RUSLE revisited: status, questions, answers, and the future, *J. Soil Water Conserv.*, 1994, Vol. 49, pp. 213–220.
49. Renard K.G., Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE), Washington, D.C., 1997.
50. Renard K.G., Yoder D.C., Lightle D.T., Dabney S.M., Universal Soil Loss Equation and Revised Universal Soil Loss Equation, *Handb. of Erosion Model. John Wiley and Sons.*, 2011, pp. 135–167.
51. Shi Z.H., Cai C.F., Ding S.W., Wang T.W., Chow T.L., Soil conservation planning at the small watershed level using RUSLE with GIS: a case study in the Three Gorge Area of China, *CATENA*, 2004, Vol. 55, pp. 33–48.
52. Singh M.C., Sur K., Al-Ansari N., Arya P.K., Verma V.K., Malik A., GIS integrated RUSLE model-based soil loss estimation and watershed prioritization for land and water conservation aspects, *Front. Environ. Sci.*, 2023, Vol. 11, 1136243.
53. Singh S., Kansal M.L., Sub-basin prioritisation using RUSLE in a Mountainous River Basin of Uttarakhand (India), *Environ. Dev. Sustain.*, 2023, Vol. 26, pp. 6851–6877.
54. Singh S.K., Influence of anthropogenic activities on landslide susceptibility: A case study in Solan district, Himachal Pradesh, India, *J. Mt. Sci.*, 2023, Vol. 20, pp. 429–447.
55. Tang Q., Xu Y., Bennett S.J., Li Y., Assessment of soil erosion using RUSLE and GIS: a case study of the Yangou watershed in the Loess Plateau, China, *Environ. Earth Sci.*, 2015, Vol. 73, pp. 1715–1724.
56. Teng H., Liang Z., Chen S., Liu Y., Viscarra Rossel R.A., Chappell A., Yu W., Shi Z., Current and future assessments of soil erosion by water on the Tibetan Plateau based on RUSLE and CMIP5 climate models, *Sci. Total Environ.*, 2018, Vol. 635, pp. 673–686.
57. Thomas J., Joseph S., Thrivikramji K.P., Estimation of soil erosion in a rain shadow river basin in the southern Western Ghats, India using RUSLE and transport limited sediment delivery function, *Int. Soil Water Conserv. Res.*, 2018, Vol. 6, pp. 111–122.
58. Wang H., Bai Y., Man X., Tang Z., Zhang S., Improved RUSLE model to simulate the effect of slope forest area on soil and water conservation, *Water Supply*, 2023, Vol. 23, pp. 2799–2813.
59. Wen X., Zhen L., Jiang Q., Xiao Y., A global review of the development and application of soil erosion control techniques, *Environ. Res. Lett.*, 2023,

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

Vol. 18, 033003.

60. Zeng C., Wang S., Bai X., Li Y., Tian Y., Li Y., Wu L., Luo G., Soil erosion evolution and spatial correlation analysis in a typical karst geomorphology using RUSLE with GIS, *Solid Earth.*, 2017, Vol. 8, pp. 721–736.



Ссылки для цитирования:

Бунин М.С., Коленченко И.А., Пирумова Л.Н., Непочатых А.Ю., Кадилина Е.П. Полнотекстовая база данных “Выдающиеся почвоведы России”: создание, назначение, использование // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2025. Вып. 125. С. 328-354. DOI: 10.19047/0136-1694-2025-125-328-354

Cite this article as:

Bunin M.S., Kolenchenko I.A., Pirumova L.N., Nepochatlykh A.Yu., Kadilina E.P., Full-text database “Outstanding soil scientists of Russia”: creation, purpose and use, Dokuchaev Soil Bulletin, 2025, V. 125, pp. 328-354, DOI: 10.19047/0136-1694-2025-125-328-354

Полнотекстовая база данных “Выдающиеся почвоведы России”: создание, назначение, использование

© 2025 г. М. С. Бунин^{*}, И. А. Коленченко^{**}, Л. Н. Пирумова^{***},
А. Ю. Непочатых^{****}, Е. П. Кадилина^{*****}

“Центральная научная сельскохозяйственная библиотека”
(ФГБНУ ЦНСХБ), Россия,

107140, Москва, Орликов пер., 3Б,

^{*}<https://orcid.org/0000-0001-5106-8732>, e-mail: bms@cnshb.ru,

^{**}<https://orcid.org/0000-0003-0810-8561>, e-mail: dir@cnshb.ru,

^{***}<https://orcid.org/0000-0003-3138-4265>, e-mail: pln@cnshb.ru,

^{****}<https://orcid.org/0009-0006-0840-5194>, e-mail: nau@cnshb.ru,

^{*****}<https://orcid.org/0000-0001-7078-294X>, e-mail: kep@cnshb.ru.

Поступила в редакцию 30.06.2025, принята к публикации 16.09.2025

Резюме: Рассмотрена полнотекстовая проблемно-ориентированная база данных (БД) “Выдающиеся почвоведы России”, созданная Федеральным государственным бюджетным научным учреждением “Центральная научная сельскохозяйственная библиотека” (ЦНСХБ) с целью информационного обеспечения научных исследований в области почвоведения и совершенствования информационно-библиотечного обслуживания ученых и специалистов АПК. Полнотекстовые БД значительно расширяют возможности доступа пользователей к информационным ресурсам, экономят их время, позволяя получить

нужную информацию на рабочий стол без физического посещения библиотеки. Включение в научный оборот полных электронных текстов наиболее значимых трудов выдающихся российских ученых почвоведов, являющихся частью научного наследия, организованных в единый структурированный массив, позволяющий проводить быстрый и эффективный поиск по отдельным атрибутам документа и полному тексту, повышает качество информационного сопровождения научных исследований по проблеме земледелия, почвоведения. Описана методика формирования БД. БД является частью комплекса информационных ресурсов ЦНСХБ, лингвистические и программные средства которого обеспечивают формирование полной библиографической записи, релевантный и быстрый поиск. Содержание БД формировалось из фонда ЦНСХБ. В результате изучения фонда, литературных и библиографических источников, консультаций со специалистами ФИЦ “Почвенный институт имени В.В. Докучаева” был сформирован список из 147 персон. В список включены наиболее известные почвоведы, внесшие большой вклад в развитие почвоведения и оставившие заметный след в науке: ученые царской России, ученые, работавшие в СССР, и ученые, работающие в настоящее время. Наука о почве родилась в России, ее называют российской наукой, поскольку именно русские ученые заложили фундамент классического почвоведения. В БД включены труды основоположников почвоведения. Созданная проблемно-ориентированная БД “Выдающиеся почвоведы России” содержит более 450 документов. Создание проблемно-ориентированных БД повышает качество информационно-библиотечного обслуживания пользователей, обеспечивая быстроту, комфортность поиска и возможность получения информации на рабочий стол исследователя. Включение ретроспективных или малоизвестных работ почвоведов в общенациональный оборот расширяет границы познания пользователей, что будет полезно ученым и практикам, изучающим исторические корни развития почвоведения.

Ключевые слова: почвоведение; информационные ресурсы; базы данных; история почвоведения; ЦНСХБ.

Full-text database “Outstanding soil scientists of Russia”: creation, purpose and use

© 2025 M. S. Bunin*, I. A. Kolenchenko**, L. N. Pirumova***,
A. Yu. Nepochatykh****, E. P. Kadilina*****

*“Central Scientific Agricultural Library” (FSBSICSAL),
3B Orlikov per., Moscow 107140, Russian Federation,
*<https://orcid.org/0000-0001-5106-8732>, e-mail: bms@cnshb.ru,
**<https://orcid.org/0000-0003-0810-8561>, e-mail: dir@cnshb.ru,
***<https://orcid.org/0000-0003-3138-4265>, e-mail: pln@cnshb.ru,
****<https://orcid.org/0009-0006-0840-5194>, e-mail: nau@cnshb.ru,
*****<https://orcid.org/0000-0001-7078-294X>, e-mail: kep@cnshb.ru.*

Received 30.06.2025, Accepted 16.09.2025

Abstract: The full-text problem-oriented database “Outstanding Soil Scientists of Russia” (DB), created by the Federal State Budgetary Scientific Institution “Central Scientific Agricultural Library” (CSAL), for the purpose of providing information for scientific research in the field of soil science and improving information and library services for agricultural scientists and specialists. Full-text DBs significantly expand users’ access to information resources, save time, allowing them to get the necessary information to their desktop without physically visiting the library. The inclusion in scientific circulation of complete electronic texts of the most significant works of outstanding Russian soil scientists, which are part of the scientific heritage, organized into a single structured array that allows for a quick and effective search for individual document attributes and full text, improves the quality of information support for scientific research on agriculture and soil science. The methodology of DB formation is described. The DB is part of the complex of information resources of the CSAL, the linguistic and software tools of which provide the formation of a complete bibliographic record, relevant and fast search. The database content was generated from the CSAL stock. As a result of studying the stock, literature and bibliographic sources, and consultations with specialists from the V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, a list of 147 people was formed. The list includes the most famous soil scientists who have made a great contribution to the development of soil science and have left a significant mark on science: scientists of tsarist Russia, scientists who worked in the USSR, and scientists working now. The science of soil was born in Russia; it is called Russian science because it was Russian scientists who laid the foundation of classical soil science. The DB includes the works of the founders of soil science. The created problem-oriented database “Outstanding Soil Scientists of Russia” contains more than 450 documents. The creation of problem-oriented DBs improves the quality of information and library services for users, providing quick and comfortable search and the ability to get information to the researcher’s desktop. The inclusion of retrospective or little-known works by soil scientists in general scientific circulation expands the boundaries of user knowledge, which will be useful for scientists and practitioners studying the historical roots of the development of soil science.

Keywords: soil science; information resources; data bases; history of soil science; CSAL.

ВВЕДЕНИЕ

Полнотекстовые базы данных (БД) – документальные БД, включающие полные тексты документов с их библиографическим описанием, значительно расширяют возможности доступа, представляя один и тот же текст в различных форматах, включая иллюстрации, графики и таблицы. Цифровизация библиотек, создание национальной электронной библиотеки побуждают библиотеки к увеличению объемов оцифровки, что способствует созданию цифровых тематических коллекций (Авдеева, 2012; Арефьева, Аврамова, 2005; Негуляев, Охезина, 2011; Полнотекстовые базы данных “Единого…”, 2013; Фадеева, 2012; Шабурова, 2006). Однако темпы и объемы оцифровки сдерживаются авторским правом, сложностью заключения лицензионных договоров с авторами, трудностями разыскания самого автора, что влияет на подбор документов в тематических коллекциях и глубину их ретроспекции (Перегоедова, Балуткина, 2012). Очевидно, что полнотекстовые БД экономят время пользователя, предоставляя не только информацию о документе, но и его полный текст. Анализ востребованности электронных ресурсов, проводимый в ЦНСХБ (Косикова и др., 2018; Косикова и др. 2020), показал, что большинство читателей предпочитают работать с электронными ресурсами: полнотекстовыми, а также реферативными и библиографическими БД и электронными каталогами.

Целью создания полнотекстовой тематической БД “Выдающиеся почвоведы России” является совершенствование информационно-библиографического обслуживания ученых и специалистов АПК за счет предоставления удаленного доступа к полнотекстовым электронным информационным ресурсам, обеспечение сохранности и доступности документов для научно-исследовательских и практических целей.

Включение в научный оборот полных электронных текстов наиболее значимых трудов выдающихся российских ученых почвоведов, являющихся частью научного наследия, организованных в единый структурированный и проиндексированный массив, поз-

воляющий проводить быстрый и эффективный поиск по отдельным атрибутам документа и полному тексту, повышает качество информационного обеспечения научных исследований по проблеме земледелия, почвоведения. Полнотекстовая БД вошла в качестве нового элемента, отвечающего современному уровню представления, структурирования и поиска информации, в систему электронных информационных ресурсов ЦНСХБ.

БД “Выдающиеся почвоведы России” предназначена для научных работников, специалистов АПК и смежных отраслей знания, сотрудников библиотек и органов НТИ, широкого круга читателей.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Формирование БД проходило в 2 этапа: этап проектирования и этап создания БД. На этапе проектирования, исходя из особенностей тематики, были определены и разработаны: концепция формирования БД – ее структура, тематический охват, принципы отбора документов, виды документов, информационная база, состав библиографического описания, технология автоматизированного формирования библиографической записи (присоединение рефератов и полных текстов), лингвистическое обеспечение, программное обеспечение, технология формирования БД, пользовательский интерфейс, формы доступа. Этап создания БД включал: контент-анализ фонда ФГБНУ ЦНСХБ, отбор документов, создание контента, научную обработку документов и ввод информации, оцифровку документов, подготовку исторических справок, написание рефератов на особо важные документы. Заключительный этап состоял в объединении библиографической записи и полного текста, присоединении обложки, реферата, исторической справки, размещении на сайте.

Информационной базой коллекции “Выдающиеся почвоведы России” является документный фонд ЦНСХБ. Ретроспекция документов в БД определена периодом XIX–XXI вв. БД включает научную, научно-практическую, обзорную информацию.

Структура БД включает 3 хронологических раздела, определяемых историческими периодами:

- почвоведы Российской империи (до 1917 г. включительно)

но);

- почвоведы советской эпохи (1918–1992 гг.);
- почвоведы современной России (1993 г. – н/в).

В качестве лингвистических средств в БД используются 5 информационно-поисковых языков (ИПЯ): язык библиографического описания в формате RUSMARC; Отраслевой рубрикатор по сельскому хозяйству и продовольствию; Информационно-поисковый тезаурус по сельскому хозяйству и продовольствию (ИПТ); Универсальная десятичная классификация (УДК); язык ключевых слов.

Отобранные для БД документы проходили научную обработку, включающую формирование библиографической записи и поискового образа документа (ПОД), который включал аннотацию (на иностранные документы), индексы УДК, коды отраслевого рубрикатора, дескрипторы тезауруса, ключевые слова. Индексирование документов, входящих в БД, проходило в соответствии с ГОСТами. На отдельные документы создавался реферат со значительным включением фактографий, позволяющий получить достаточно полное представление о содержании документа без обращения к первоисточнику.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

База данных является компонентом информационно-библиотечной системы ЦНСХБ – автономной полнотекстовой БД и составной частью Электронной библиотеки ЦНСХБ. БД создавалась в АБИС OPAC-Global и представлена на сайте ЦНСХБ в блоке “Базы данных собственной генерации”.

Информация о наличии полного текста документа появляется на экране вместе с библиографической записью (рис. 1). На экране полный текст документа отображается постранично (возможно отображение разворота). Возможен поиск по фрагменту слова и переход к заданной странице. Пользователь может сделать закладки и распечатать заложенную страницу, что не противоречит действующему законодательству. В БД есть механизм запрета на копирование документа целиком или отдельных страниц (не закладок).

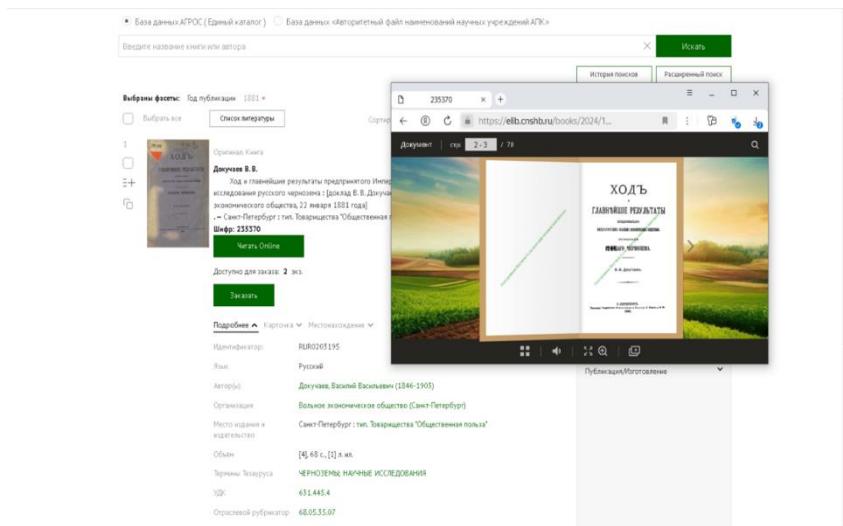


Рис. 1. Пример отображения информации о наличии полного текста в БД.

Fig. 1. Example of displaying information about the presence of full text in a database.

Программные средства позволяют обеспечить различные формы доступа в зависимости от правового статуса документа и разрешения на доступ (ограниченный или неограниченный доступ). Зарегистрированным пользователям и из читальных залов библиотеки доступны документы любого статуса. При переходе в режим отображения документа высвечивается библиографическая запись, которая при наличии сопровождается изображением обложки (или ее аналога) и ссылкой на полный текст.

Для формирования запроса, поиска, просмотра и выдачи информации используются различные возможности АБИС ОРАС-Global. Навигация по разделам обеспечивает поиск по 3 хронологическим разделам. Навигация через поиск соответствует общепринятыму поиску по элементам библиографических записей документов и элементам ПОД. Элементы библиографического описания (от 20 до 250 полей формата RUSMARC) обеспечивают

идентификационный поиск по формальным признакам документа, а остальные элементы ПОДа – релевантный тематический поиск. В БД существует 2 вида поиска: *простой* (термины, автор); *сложный* – по полям формата (шифр, автор, заглавие, вид документа, ключевые слова, язык, страна, год издания), как по отдельным полям, так и по сочетанию нескольких полей.

Доступ к документам предоставляется в зависимости от статуса документа. Включаются документы, на которые не распространяется действие авторского права, а также документы, с авторами которых заключен лицензионный договор. Например, доступ к документу, на который автор по лицензионному соглашению ограничил свободный доступ, осуществляется только в читальном зале ЦНСХБ и только авторизированным пользователям из виртуальных читальных залов через удаленный терминал.

Контент БД формировался из документов ретрофонда ЦНСХБ. Проводились исторические изыскания. Изучали историю формирования почвоведения как науки. Проводили консультации со специалистами Федерального исследовательского центра “Почвенный институт имени В.В. Докучаева” в процессе формирования списка выдающихся почвоведов России. Был составлен список из 125 персон, внесших большой вклад в развитие почвоведения и оставивших заметный след в науке по 3 хронологическим периодам: ученые царской России; ученые, работавшие в СССР; и ученые, работающие в настоящее время. Среди них Иван Николаевич Антипов-Каратаяев, Владимир Иванович Вернадский, Василий Робертович Вильямс, Георгий Николаевич Высоцкий, Геннадий Павлович Гамзиков, Константин Каэтанович Гедройц, Константин Дмитриевич Глинка, Василий Васильевич Докучаев, Алексей Григорьевич Дояренко, Александр Николаевич Каштанов, Петр Самсонович Коссович, Павел Андреевич Костычев, Сергей Семенович Неуструев, Дмитрий Николаевич Прянишников, Николай Михайлович Сибирцев, Александр Иванович Стебут, Николай Максимович Тулайков, Иван Владимирович Тюрин и др. Затем, путем более глубоких изысканий, был выявлен ряд ученых, менее известных широкому кругу читателей, но внесших существенный вклад в развитие почвоведения. Включение в данный информационный продукт персон, чьи имена по прошествии

времени стали забываться, имеет целью сделать их достоянием широкого круга ученых и специалистов в области почвоведения. Таким образом, в список было добавлено еще 22 персоны, среди которых Аболин Р.И., Адамов Н.П., Бараков П.Ф., Драницын Д.А., Домрачева Е.А., Ризположенский Р., Постников А., Филатов М.М. и др. Поскольку существуют большие правовые ограничения по предоставлению полнотекстовых документов в свободном доступе, было принято решение начать формирование коллекции с документов, на которые уже не распространяется авторское право. Поэтому в первую очередь отбирали для включения в БД документы, изданные спустя 75 лет после смерти автора, т. е. до 1950 г. Таким образом, были сформированы с возможной полнотой 2 хронологических раздела БД: раздел “до 1917 г.” (труды ученых, работавших в Российской империи) и частично раздел “1918–1992 гг.” (труды ученых, работавших в годы советской власти, изданные до 1950 г.).

Для формирования раздела “1993 – н/в”, т. е. включения трудов современных ученых-почвоведов потребуется заключение с ними лицензионных договоров, разрешающих размещение трудов в открытом доступе. Наибольшая трудность будет связана с включением трудов, изданных после 1950 г., ученых, уже ушедших из жизни. Для размещения их в открытом доступе требуется разрешение наследников, получить которое крайне затруднительно. Поэтому эти труды предполагается размещать со статусом “ограниченного доступа” (только в читальных, в т. ч. удаленных, залах ЦНСХБ).

На заглавной странице БД представлено описание БД и краткая история формирования и развития науки почвоведения в России – науки о почве, ее составе, свойствах, происхождении, распространении, использовании, деградации и восстановлении, которая изучает почву как самостоятельное природное тело. Как известно, это комплексная мультидисциплинарная область знаний с единым объектом изучения; она базируется на данных геологии, биологии, географии, химии, физики и других наук (Большая российская энциклопедия, 2016).

В России интерес к почвам, их особенностям, свойству, плодородию появился задолго до того, как почвоведение стало

наукой. Это было обусловлено особенностями географии, климата, экономики страны – огромное пространство, неблагоприятные климатические условия, аграрный характер производства. Почва, ее свойства, проявляющиеся в плодородии, привлекали внимание исследователей. Например, М.В. Ломоносов изучал почвы, и некоторые исследователи называют его первым почвоведом (Мирецкая, 2020).

Наука о почве родилась в России, ее называют российской наукой, поскольку именно русские ученые заложили фундамент классического почвоведения. Основы его сформированы выдающимися учеными В.В. Докучаевым и П.А. Костычевым. В конце XVIII–начале XIX вв. почвоведение еще не стало самостоятельной наукой, оно рассматривалось как раздел геологии (М.В. Ломоносов, В.М. Серегин) и основоположники его – В.В. Докучаев и Н.М. Сибирцев были геологами. В.В. Докучаев изучал закономерности современных геологических процессов – формирование речных пойм, развитие эрозии, преподавал минералогию и кристаллографию. Н.М. Сибирцев решал задачи региональной геологии Верхнего и Среднего Поволжья. В конце XIX в. почвоведение было включено в реестр фундаментальных наук, тем самым были признаны самостоятельность и фундаментальность этой науки.

В России к началу XVIII в. было накоплено большое количество практических сведений о свойствах различных почв, но сведения эти были часто эмпирическими, разрозненными. Проходил процесс накопления и систематизации знаний о почвах. Зарождением науки о почвах считают 10 декабря 1883 г. – день защиты в Санкт-Петербургском университете докторской диссертации В.В. Докучаевым “Русский чернозем” и выхода в свет в этом же году этого знаменитого труда (рис. 2), положившего начало современному генетическому почвоведению как самостоятельной естественно-исторической науки.

В нем почва рассматривалась как самостоятельное естественно-историческое тело, формирующееся при взаимодействии различных факторов. В.В. Докучаев разработал профильные и почвенно-геоморфологические методы изучения почв, открыл законы природной зональности и выявил географические законо-

мерности распространения почв. В основу классификации почв он положил генетический принцип, т. е. происхождение почв.

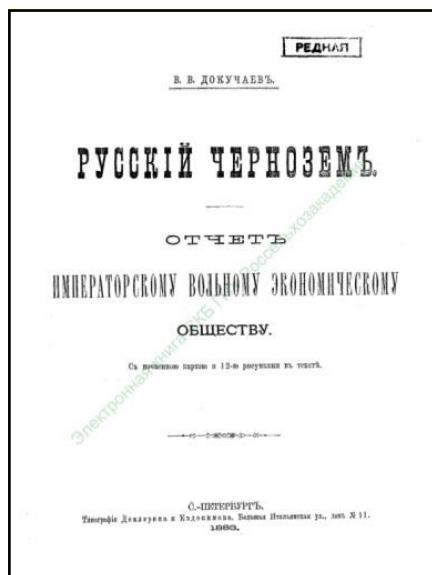


Рис. 2. Скан обложки книги Докучаева В.В. “Русский чернозем”.
Fig. 2. Scan of the cover of the V.V. Dokuchaev’s book “Russian chernozem”.

В.В. Докучаев сформулировал в ряде своих работ научное представление о почве, изложил теоретические основы почвоведения как самостоятельной науки. На примере чернозема доказал, что почва подобно минералам, растениям и животным представляет собой естественно-историческое тело. П.А. Костычев подчеркнул ведущую роль растительности как фактора почвообразования и определил почву как “верхний слой земли до той глубины, до которой доходит главная масса растительных корней”. По В.Р. Вильямсу, почвой называют верхний рыхлый слой земной коры, способный производить урожай растений. Существенным свойством почвы является плодородие, которое отличает почву от бесплодной горной породы.

К концу XIX в. почвоведение в России успешно развивалось. В Санкт-Петербургском университете на физико-математическом факультете в 1885 г. под руководством А.В. Советова и В.В. Докучаева издается журнал “Материалы по изучению русских почв”, а в 1899 г. под руководством П.В. Отоцкого стал издаваться журнал “Почвоведение”.

Начало XX в. характеризуется интенсивным развитием почвенно-географических исследований, исследований почв отдельных районов, выявление земель, пригодных для развития сельского хозяйства. В 1904 г. открыт Центральный музей почвоведения. Уже в 1920–1930-х годах почвоведение получило признание. Продолжались работы по выявлению и оценке почвенных ресурсов страны, обследовались обширные территории, создавались почвенные карты различных регионов России. Обобщение полученных результатов отразилось в монографиях ряда ученых: К.Д. Глинки – “Почвы России и прилегающих стран” (1923), Л.И. Прасолова – “Почвенные области России” (1922), С.С. Неуструева – “Элементы географии почв” (1931), А.А. Роде – “Подзолообразовательный процесс” (1937), А.А. Красюк – “Почвы и их исследование в поле” (1931). В этот же период широкое развитие получили исследования в области химии почв. Работы К.К. Гедройца по изучению коллоидно-химической природы процессов почвообразования, начатые еще в дореволюционный период, получили дальнейшее развитие.

В середине XX в. продолжались исследования почв и почвенного покрова в различных регионах страны. Собранные материалы легли в основу разработки приемов оптимизации физико-химических свойств пахотных почв.

В 1970-е годы особое внимание уделялось изучению состава и свойств пахотных и луговых дерново-подзолистых почв и их изменению под влиянием длительного сельскохозяйственного использования.

Важнейшей задачей почвоведения, географии почв является всестороннее изучение строения, состава, свойств, закономерностей дифференциации почвенного покрова с целью рационального использования земельных ресурсов. Как отмечают Г.Д. Белицина и др. (1988), почвоведение дифференцируется в зависимости от

характера использования почв на сельскохозяйственное, лесное, санитарное, инженерное. Решение продовольственной программы во многом зависит от состояния сельскохозяйственного почвоведения.

Агропочвоведение является научной основой для разработки методики регулирования плодородия почв с учетом региональных особенностей различных частей нашей страны (Основы почвоведения..., 2021, С. 6–8).

Контент БД включает документы научного, научно-технического, научно-практического, методического, обзорного характера, в том числе монографии, учебники, авторефераты и статьи российских ученых-почвоведов. Прежде всего в БД включены основные труды Василия Васильевича Докучаева (1846–1903) как основоположника российского почвоведения. В.В. Докучаев – выдающийся ученый-естественноиспытатель, основатель науки о почве. По словам В.И. Вернадского, В.В. Докучаев не только создал целую школу в России, но и оказал большое влияние за пределами отечества.

В работе “Картография русских почв” (1879) В.В. Докучаев делает вывод, что почва – это “...вполне самостоятельное естественно-историческое тело, которое является продуктом совокупной деятельности: грунта, климата, растений и животных, возраста страны и, отчасти, рельефа местности” (рис. 3). Это положение В.В. Докучаева, в дальнейшем получившее название учения о факторах почвообразования, легло в основу изучения почв, их пространственной дифференциации.

В БД включен ряд книг ученика и последователя В.В. Докучаева – Константина Дмитриевича Глинки (1867–1927). Он как крупнейший специалист в области минералогии почв и исследования процессов выветривания – основоположник палеопочвоведения, составил почвенные карты России и мира, дал характеристики основных типов почв, закрепил таксономическое значение этого понятия. Первый академик-почвовед, профессор, действительный член АН СССР, выдающийся организатор, первый директор Почвенного института им. В.В. Докучаева и первый ректор Воронежского сельскохозяйственного института имени императора Петра I. К.Д. Глинка внес крупный вклад в развитие таких

направлений в науке о почве, как генезис, география, картография и минералогия почв.



Рис. 3. Скан обложки книги В. В. Докучаева “Картография русских почв”.

Fig. 3. Scan of the cover of V. V. Dokuchaev's book "Cartography of Russian soils".

В БД включены наиболее значимые труды К.Д. Глинки, в том числе работа “Дисперсные системы в почве / К.Д. Глинка, профессор Ленинградского университета и Сельскохозяйственного института. – Ленинград: Культурно-просветительское трудовое товарищество “Образование”, 1924. — 78, [1] с., табл.; 25 см” (рис. 4), в которой сформулировано понятие о дисперсных системах, представлена классификация почвенных супензий, почвенных коллоидов и растворов, затронуты вопросы электрической адсорбции и коагуляции, а также химической адсорбции.

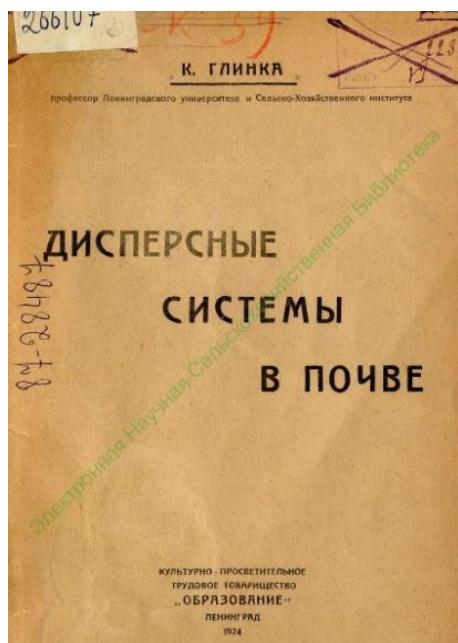


Рис. 4. Скан обложки книги К.Д. Глинки “Дисперсные системы в почве”.
Fig. 4. Scan of the cover of K.D. Glinka's book “Dispersed systems in soil”.

В БД также включены работы Д.Н. Прянишникова (1865–1948). Дмитрием Николаевичем Прянишниковым сделан фундаментальный вклад в учение о питании высших растений и применении удобрений. На его трудах было воспитано много поколений агрономов и научных работников в области физиологии и биохимии растений и агрохимии. Работы Д.Н. Прянишникова и теперь являются источником знаний для учащейся молодежи в России и за рубежом. На основе разработанных им теорий агрохимия одерживает новые победы и в наши дни, а выводы из экспериментальных работ Д.Н. Прянишникова служат руководящими указаниями для практики рационального использования органических и минеральных удобрений – одного из важнейших средств повышения плодородия почвы и подъема урожайности возделываемых куль-

тур. В БД представлена, например, книга “Учение об удобрении: агрономическая химия (избранные главы) / Д.Н. Прянишников. 5-е изд. – Берлин : Р.С.Ф.С.Р. Государственное издательство, 1922. – VIII, 426, [2] с. : ил., табл. ; 23 см.” (рис. 5). В книге представлены данные по применению азотистых, фосфорнокислых и калийных удобрений, а также полных удобрительных веществ и косвенных удобрений. Даны методика постановки опытов с удобрениями.

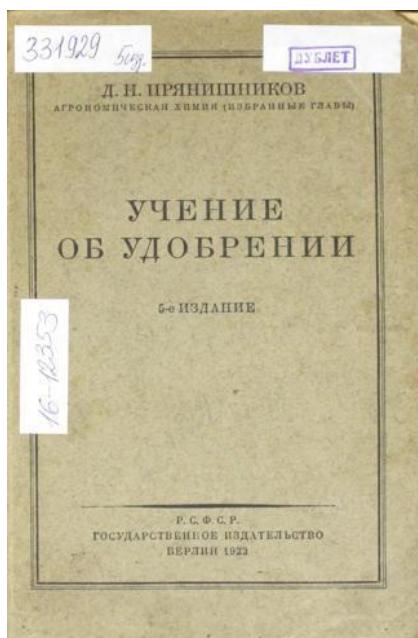


Рис. 5. Скан обложки книги Д.Н. Прянишникова “Учение об удобрении”.
Fig. 5. Scan of the cover of D.N. Pryanishnikov’s book “The Doctrine of Fertilizer”.

БД включает ряд фундаментальных работ Николая Михайловича Сибирцева (1860–1900), ученика В.В. Докучаева, участвовавшего в 2 экспедициях под его руководством. Н.М. Сибирцев сыграл важную роль в становлении почвоведения, географии почв, с 1892 г. заведовал первой кафедрой почвоведения в Но-

воалександрийском институте сельского хозяйства и лесоводства, автор первого учебника по почвоведению (Почвоведение в Санкт-Петербурге… 2013, С. 29), переиздававшегося 4 раза.

Н.М. Сибирцев разработал учение о почвенной зональности, генетическую классификацию почв, метод их бонитировки, изучил геологию Окско-Клязьминского региона. В базу включены, например, “Избранные сочинения : в 2 т., Т. 1. Почвоведение / Н.М. Сибирцев ; [под редакцией и с предисловием доктора сельскохозяйственных наук проф. С. С. Соболева]. – Москва : Сельхозгиз, 1951. – 472 с., [1] л. портр. : ил., табл. + прил. (2 л. табл.)”.

В первом томе затронуты вопросы почвообразования, географии и картографии, бонитировки и классификации почв. Даны понятия агрохимических и агрофизических свойств почв, а также представлены методы исследования этих свойств. Во втором томе опубликованы материалы по исследованию почв Нижегородской губернии, труды экспедиции, снаряженной лесным департаментом под руководством профессора В.В. Докучаева, а также избранные статьи, доклады и речи.

Также в БД включены работы Павла Андреевича Костычева (1845–1895) – почвоведа, основателя научного почвоведения, агронома, ботаника, систематика, химика-аналитика, основателя почвенной микробиологии. П.А. Костычев – автор популярного учебника “Почвоведение” в 3 частях (1886–1887 гг.). Он уточнил само понятие “почва”, описал процесс происхождения черноземов и других почв, разработал способы их улучшения, выявив причины истощения. В БД включено, например, “Общедоступное руководство к земледелию : с рисунками / составил П. Костычев. - Изд. 4-е. – Москва : тип. Вильде, 1905. – 208 с. : ил. ; 24 см. – (Деревенское хозяйство и деревенская жизнь / под редакцией И. Горбунова-Посадова ; кн. 5)” (рис. 6).

Эта книга – учебник для крестьян, в котором подчеркивается важная роль микроорганизмов. Здесь даны ценные практические сведения: беречь верхний слой почвы, в котором живут микроорганизмы; на старопахотных почвах уметь воссоздать комковатую почвенную структуру, не запахивать верхний слой глубоко, а если такая необходимость есть, то верхний слой не переворачивать, а крошить. Учебник выдержал 9 изданий.

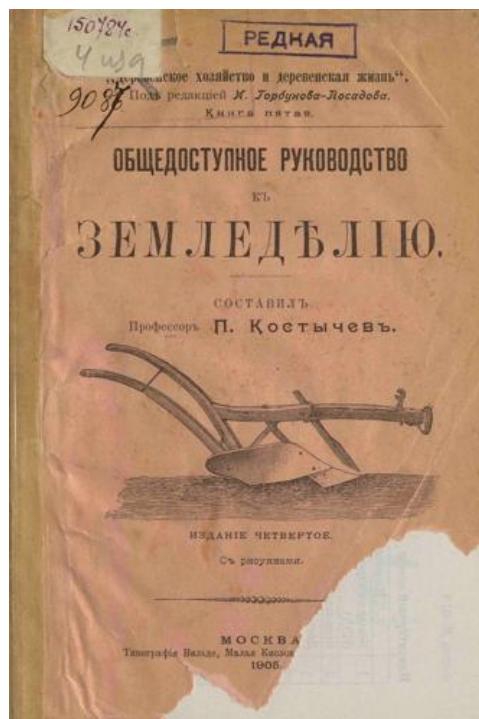


Рис. 6. Скан обложки книги П.А. Костычева “Общедоступное руководство к земледелию”.

Fig. 6. Scan of the cover of P.A. Kostychev's book "A publicly available guide to agriculture".

Среди русских и советских почвоведов выделяется Леонид Иванович Прасолов (1875–1954) – последователь В.В. Докучаева. Его труды имеют большое значение для построения генетической почвенной классификации. Л.И. Прасолов создал научный фундамент современной почвенной картографии, разработал для почвенных карт цветовую шкалу, систему буквенных индексов, создал методику учета почвенных ресурсов. Он разработал учение о почвенных провинциях и основные принципы почвенно-географического районирования, подробно описал мерзлотные,

подзолисто-глеевые почвы, буровоземы, черноземы, а также бурые лесные почвы Кавказа и Крыма, их генезис, географию распространения. Исследования Л.И. Прасолова посвящены генезису, географии, картографии и классификации почв, а также методам составления мелкомасштабных почвенных карт. Его труды явились основой для построения историко-географо-генетической классификации почв. Л.И. Прасолов впервые провел подсчеты почвенных ресурсов мира и отдельных стран, установив наличие больших, еще не используемых земельных фондов, пригодных для сельскохозяйственного использования.

В БД включены основные труды Л.И. Прасолова, в том числе книга “География почв, как фактор сельского хозяйства – Soil geography as a factor of agriculture / проф. Л. И. Прасолов. – Ленинград: Гос. ин-т опыт. агрономии, 1929. — 41, [1] с. ; 24 см. - (Новейшие достижения и перспективы в области агрономии = Recent attainments and perspectives in agronomy / РСФСР, Нар. комиссариат земледелия, Гос. ин-т опыт. агрономии)”.

В книге отражено современное состояние географии почв, дан общий обзор почвенных областей и зон земного шара. Представлены характеристики почв СССР.

В БД представлены работы Константина Каэтановича Гедройца (1872–1932) – российского и советского почвоведа-агрохимика, основоположника коллоидной химии почв, академика Академии наук СССР. К.К. Гедройц разработал основы коллоидной химии почв, методы химического анализа и принципы классификации почв, изучил природу солонцеватости почв и на этой основе разработал теорию мелиорации солонцовых почв. Он автор учения о поглотительной способности почвы.

В БД отражены разноплановые труды К.К. Гедройца. Например, “Почва как культурная среда для сельскохозяйственных растений. Почвенные коллоиды и солонцеватость почв : по данным Агрохимического отдела Носовской с.-х. опытной станции : популярный очерк : с 2 картами и 8 рисунками / проф. К. К. Гедройц. — Киев : [б. и.], 1926 г. - 66 с., 2 л. карт ; 26 см.” (рис. 7).

В популярном очерке представлена взаимосвязь роста сельскохозяйственных культур и коллоидальных свойств почвы Носовской станции.



Рис. 7. Скан обложки книги К.К. Гедройца “Почва как культурная среда для сельскохозяйственных растений. Почвенные коллоиды и солонцеватость почв: по данным Агрохимического отдела Носовской с.-х. опытной станции: популярный очерк”.

Fig. 7. Scan of the cover of K.K. Giedroyt's book “Soil as a cultural environment for agricultural plants. Soil colloid sand salinity of soils: according to data of the Agrochemical Department of Nosovskaya Agricultural Experimental Station: a popular essay”.

В БД представлены труды Алексея Григорьевича Дояренко (1874–1958), основателя научной школы агрофизики. Его методы исследования физических свойств почвы широко применяются и в настоящее время. Велики заслуги А.Г. Дояренко в организации сельскохозяйственного опытного дела в стране и в разработке методики полевых опытов. По его инициативе был основан “Научно-

агрономический журнал". Алексей Григорьевич постоянно выступал со статьями по вопросам общественной агрономии, методики опытного дела, методики обучения агрономии. В работе "Обработка почвы / А. Г. Дояренко, профессор Петровской с.-х. академии. – Изд. 2-е. – Москва : Экономическая жизнь, 1924. – 13 с. ; 26 см. – (Популярная библиотека "Экономической жизни". Серия "Сельское хозяйство"; № 31)" (рис. 8), рассматриваются способы обработки почвы, влияние их на урожайность сельскохозяйственных культур, а также дается характеристика сельскохозяйственного орудия для обработки почвы.



Рис. 8. Скан обложки книги А.Г. Дояренко "Обработка почвы".
Fig. 8. Scan of the cover of A.G. Doyarenko's book "Tillage".

Труды Ивана Александровича Стебута (1833–1923) также представлены в БД. И.А. Стебут – агроном, педагог, общественный деятель. Он создал первую отечественную классификацию полевых культур, обосновал применение систем земледелия и систематическое удобрение почв. Занимался внедрением в производство новых для российских хозяйств кормовых культур, восстановлением и расширением площадей возделывания льна. И.А. Стебут разработал приемы известкования и гипсования кислых почв, лесомелиоративные мероприятия. Он успешно преподавал в различных учебных заведениях, включая Горыгорецкий земледельческий институт и Петровскую земледельческую и лесную академию. В 1898–1905 гг. И.А. Стебут был официальным руководителем аграрной науки страны и председателем Ученого комитета Министерства земледелия и государственных имуществ. В БД включена среди прочих его книга “Статьи о русском сельском хозяйстве, его недостатках и мерах к его усовершенствованию. 1857–1882 г. / [соч.] И. А. Стебута. – Москва : изд. А. Л. Васильева, 1883. (Москва : Тип. А. Иванова, 1883).– [2], 362 с. : табл. ; 25 см.”. В книге говорится о недостатках в современном положении сельскохозяйственной промышленности. Приводится отчет об агрономическом путешествии в Остзейские губернии, заметки о поездках в некоторые степные губернии. Также включены главы, посвященные обеспечению скота кормовыми средствами в северной, средней и черноземной части России.

Советский почвовед, агроном, ботаник Николай Максимович Тулайков (1875–1938) является автором более 400 научных и научно-популярных работ, посвященных разнообразным вопросам теоретической и практической агрономии. Основной сферой его научных интересов была борьба с засухой, в рамках которой он разработал агротехнические приемы, позволяющие получить высокие и устойчивые урожаи полевых культур в условиях засушливых районов. Большая часть работ Н.М. Тулайкова посвящена сеяно-ворошением, бессменной культуре, занятым парам, выращиванию кукурузы в Поволжье, агротехнике зерновых культур и другим вопросам. В БД включены особо значимые работы, в том числе книга “Озимая рожь, яровая пшеница, овес и приемы их возделывания : (для земледельцев засушливого Юго-Востока) /

Н. Тулайков.– Москва : Новая деревня, 1922. – 16, 16, 8 с. ; 22 см.
– (Библиотека земледельца” (рис. 9).

В книге описано значение обработки почвы под посевы ржи, рассмотрены особенности озимой ржи по занимаемым парам, даны рекомендации по удобрению паров, рассмотрена агротехника посева и ухода за посевами, а также уборки урожая. Приведены данные по посевным площадям, сбору урожая за 1910–1914 гг.



Рис. 9. Скан обложки книги Н.М. Тулайкова “Озимая рожь, яровая пшеница, овес и приемы их возделывания”.

Fig. 9. Scan of the cover of N.M. Tulaykov's book “Winter rye spring wheat, oats and methods of their cultivation”.

ВЫВОДЫ

Созданная проблемно-ориентированная БД “Выдающиеся почвоведы России” содержит более 450 документов, в том числе 431 книгу и 19 статей, из них 431 документ имеет полный текст. Создание проблемно-ориентированных БД повышает качество информационно-библиотечного обслуживания пользователей, обеспечивая быстроту и комфортность поиска, и возможность получения информации на рабочий стол исследователя. Включение ретроспективных или малоизвестных работ почвоведов в общенаучный оборот расширяет границы познания пользователей, что будет полезно ученым, рассматривающим исторические корни развития почвоведения, и современным практикам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авдеева Н.В. Особенности организации полнотекстовых баз данных неопубликованных документов // Библиотековедение. 2012. № 3. С. 39–46.
2. Арефьева М.И., Аврамова Е.В. Использование фонда библиографических, фактографических и полнотекстовых баз данных ЦГПБ им. В.В. Маяковского в справочно-информационном обслуживании // Библиотечные фонды: проблемы и решения. 2005. № 8. URL: <https://www.rba.ru/content/activities/section/12/mag/mag08/22.pdf>.
3. Большая российская энциклопедия / М-во культуры Рос. Федерации. URL: <https://bigenc.ru/c/pochvovedenie-998fb4>.
4. Косикова Н.В., Коленченко И.А., Степлецкий В.И. Мониторинг востребованности электронных ресурсов по проблематике АПК на базе Федерального государственного научного учреждения “Центральная научная сельскохозяйственная библиотека” // Московский экономический журнал. 2018. № 4. URL: <http://qje.su/ekonomicheskaya-teoriya/moskovskij-ekonomicheskij-zhurnal-4-2018-52>.
5. Косикова Н.В., Коленченко И.А., Степлецкий В.И. Полнотекстовые информационные ресурсы ЦНСХБ: состав, востребованность // Московский экономический журнал. 2020. № 9. С. 382–396. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/polnotekstovye-informatsionnye-resursy-tsnszb-sostav-vostrebovannost?ysclid=lik01d91se912432421>.
6. Мирецкая М.Н. Почвоведение как наука // Корпоративный портал ТПУ. URL: <https://portal.tpu.ru/SHARED/n/NMMuchrab/Tab/Soil1.pdf>.
7. Негуляев Е.А., Охезина Е.А. Создание и сбор полнотекстовых

- электронных ресурсов в университетской библиотеке // Электронный научный архив УрФУ. URL: https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/92/1/Negulyaev_Okhezina.pdf.
8. Основы почвоведения / Б.Ф. Пищеничникова, Н.Ф. Пищеничникова, В.Г. Трегубова, А.В. Брикман; ответственный редактор Б.Ф. Пищеничников. Владивосток: Изд-во Дальневост. федерал. ун-та, 2021. 69 с.
9. Переходова Н.В., Балуткина Н.А. Полнотекстовые базы данных в структуре информационных ресурсов собственной генерации: проблемы формирования, использование (опыт ОНБ ГПНТБ СО РАН) // Научные библиотеки России: взгляд в будущее. URL: https://conf.nsc.ru/confer_2012/ru/reportview/128799.
10. Полнотекстовые базы данных “Единого информационного пространства Белгородской области”: в помощь пользователям электронных ресурсов / Красногвард. центр. район. б-ка. Бирюч: ЦРБ, 2013. 10 с.
11. Почвоведение в Санкт-Петербурге. XIX–XXI вв.: биогр. очерки. Санкт-Петербург: Нестор-История, 2013. 404 с.
12. Фадеева И.Н. Создание собственных полнотекстовых баз данных – перспективное направление работы Центров социально значимой информации // Концепция инновационной работы: опыт МКУК “ЦБС ЗГО”: материалы зонального семинара / МКУК “Централиз. библ. система Златоуст. гор. округа”. Златоуст, 2012. С. 7–9.
13. Шабурова Н.Н. Анализ использования полнотекстовых баз данных в информационно-библиотечном обслуживании научных исследований // Библиосфера. 2006. № 7. С. 7–12.

REFERENCES

1. Avdeeva N.V., Osobennosti organizatsii polnotekstovykh baz dannykh neopublikovannykh dokumentov (Features of the organization of full-textdatabases of unpublished documents), *Bibliotekovedenie*, 2012, No. 3, pp. 39–46.
2. Arefeva M.I., Avramova E.V., Ispol'zovanie fonda bibliograficheskikh, faktograficheskikh i polnotekstovykh baz dannykh TsGPB im. V.V. Mayakovskogo v spravochno-informatsionnom obsluzhivanii (Use of the collection of bibliographic, factualand full-textdatabases of the Central State Public Library named after V.V. Mayakovsky in the reference and informationservice), *Bibliotechnye fondy: problemy i resheniya*, 2005, No. 8, URL: <https://www.rba.ru/content/activities/section/12/mag/mag08/22.pdf>.

3. *Bol'shaya rossiiskaya entsiklopediya* (The Great Russian Encyclopedia), URL: <https://bigenc.ru/c/pochvovedenie-998fb4>.
4. Kosikova N.V., Kolenchenko I.A., Stelletskii V.I., Monitoring vostrebovannosti elektronnykh resursov po problematike APK na baze Federal'nogo gosudarstvennogo nauchnogo uchrezhdeniya "Tsentral'naya nauchnaya sel'skokhozyaistvennaya biblioteka" (Monitoring of the demand for electronic resources on the basis of the Federal State Scientific Institution "Central Scientific Agricultural Library"), *Moskovskii ekonomicheskii zhurnal*, 2018, No. 4, URL: <https://qje.su/ru/nauka/article/74642/view>.
5. Kosikova N.V., Kolenchenko I.A., Stelletskii V.I., Polnotekstovye informatsionnye resursy TsNSKhB: sostav, vostrebovannost' (Full-text information resources of the CSAL: composition, relevance), *Moskovskii ekonomicheskii zhurnal*, 2020, No. 9, URL: <https://qje.su/ru/storage/view/142360>.
6. Miretskaya M.N., Pochvovedenie kak nauka (Soil science as a science), *Korporativnyi portal TPU*, URL: <https://portal.tpu.ru/SHARED/n/NMMuchrab/Tab/Soil1.pdf>.
7. Negulyaev E.A., Okhezina E.A., Sozdanie i sbor polnotekstovykh elektronnykh resursov v universitetskoi biblioteke (Creation and collection of full-text electronic resources in the university library), *Elektronnyi nauchnyi arkhiv UrFU*, URL: https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/92/1/Negulyaev_Okhezina.pdf.
8. Pshenichnikov B.F., Pshenichnikova N.F., Tregubova V.G., Brikman A.V., *Osnovy pochvovedeniya* (Fundamentals of soil Science), Vladivostok: Izd-vo Dal'nevost. federal. un-ta, 2021, 69 p.
9. Peregoedova N.V., Balutkina N.A., Polnotekstovye bazy dannykh v strukture informatsionnykh resursov sobstvennoi generatsii: problemy formirovaniya, ispol'zovanie (opyt ONB GPNTB SO RAN) (Full-text databases in the structure of information resources of their own generation: problems of formation, use (experience of ONB GPSTB SBRAS)), *Nauchnye biblioteki Rossii: vzglyad v budushchee*, URL: http://conf.nsc.ru/confer_2012/ru/reportview/128799.
10. *Polnotekstovye bazy dannykh "Edinogo informatsionnogo prostranstva Belgorodskoi oblasti: v pomoshch' pol'zovatelyam elektronnykh resursov"* (Full-text databases of the "Unified Information Space of the Belgorod region: to help users of electronic resources"), Biryuch: TsRB, 2013, 10 p.
11. *Pochvovedenie v Sankt-Peterburge. XIX–XXI vv.* (Soil science in St. Petersburg. XIX–XXI centuries), Saint-Petersburg: Nestor-Istoriya, 2013, 404 p.

12. Fadeeva I.N., Sozdanie sobstvennykh polnotekstovykh baz dannykh – perspektivnoe napravlenie raboty Tsentrów sotsial'no znachimoi informatsii (Creation of own full-textdatabasesis a promisingarea of work for Centers of Socially Significant Information), *Kontseptsiya innovatsionnoi raboty: opyt MKUK "TsBS ZGO"* (The concept of innovativework: the experience of MKUK "CBSZGO"), Proc. of the zonalseminar, Zlatoust, 2012, pp. 7–9.
13. Shaburova N.N., Analiz ispol'zovaniya polnotekstovykh baz dannykh v informatsionno-bibliotekhnicheskikh obsluzhivanii nauchnykh issledovanii (Analysis of the use of full-textdatabasesininformation and libraryservices for scientificresearch), *Bibliosfera*, 2006, No. 7, pp. 7–12.

Научное издание

Бюллетень Почвенного института
имени В.В. Докучаева

Выпуск 125

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 25.10.2025 г.
Подписано в печать 25.10.2025 г.
Формат 60×84/16. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 20,8 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-grpa@list.ru