

ISSN 2618-6802 (online)



Почвы и окружающая среда

Научный журнал

Том 7. Выпуск 2

2024

<https://soils-journal.ru>

The Journal of Soils and Environment

Scientific Journal

Volume 7. Issue 2

2024



Научный журнал «Почвы и окружающая среда» создан с целью распространения знаний о взаимоотношении почв и их окружения во всех проявлениях – от биотического до социокультурного и производственно-экономического. В задачи журнала входит обсуждение актуальных проблем почвоведения, агрохимии и экологии почв, их концептуальных прорывов и прикладных разработок, которые могут быть использованы для охраны окружающей среды, сельскохозяйственного производства и в других отраслях экономики.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор:

Андроханов Владимир Алексеевич – доктор биологических наук, директор ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (Новосибирск, Россия)

Заместители главного редактора:

Дергачева Мария Ивановна – доктор биологических наук, главный научный сотрудник лаборатории биогеоценологии ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (Новосибирск, Россия)

Якименко Владимир Николаевич – доктор биологических наук, заведующий лабораторией агрохимии ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (Новосибирск, Россия)

Члены редколлегии:

Абакумов Евгений Васильевич – профессор РАН, доктор биологических наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной экологии биолого-почвенного факультета ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет» (Санкт-Петербург, Россия)

Бойко Василий Сергеевич – доктор сельскохозяйственных наук, доцент, заместитель директора по научной работе ФГБНУ Омский аграрный научный центр (Омск, Россия)

Будажанов Лубсан-Зонды Владимирович – член-корреспондент РАН, доктор биологических наук, профессор, главный научный сотрудник отдела новых технологий и алгоритмов развития Арктики ГБУ Академия наук Республики Саха (Якутия, Россия).

Гамзиков Геннадий Павлович – академик РАН, доктор биологических наук, профессор агрохимии ФГБОУ ВО Новосибирский государственный аграрный университет (Новосибирск, Россия)

Гольева Александра Амуриевна – доктор географических наук, главный научный сотрудник лаборатории географии почв ФГБУН Институт географии РАН (Москва, Россия)

Кулижский Сергей Павлович – доктор биологических наук, профессор, проректор по социальным вопросам, заведующий кафедрой почвоведения и экологии почв Института биологии, экологии, почвоведения, сельского и лесного хозяйства ФГБОУ ВО Национальный исследовательский Томский государственный университет (Томск, Россия)

Колесников Сергей Ильич – доктор сельскохозяйственных наук, профессор, заведующий кафедрой экологии и природопользования ФГБОУ ВО «Южный федеральный университет» (Ростов-на-Дону, Россия)

Пузанов Александр Васильевич – доктор биологических наук, профессор, директор ФГБУН Институт водных и экологических проблем СО РАН (Барнаул, Россия)

Седов Сергей Николаевич – кандидат биологических наук, ведущий исследователь Института геологии Национального автономного университета Мексики (UNAM, Мехико, Мексика), ведущий научный сотрудник ФГБУН Федеральный исследовательский центр «Тюменский научный центр СО РАН» (Тюмень, Россия)

Сиромля Татьяна Ивановна – доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории биогеохимии почв ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (Новосибирск, Россия)

Соколов Денис Александрович – доктор биологических наук, заведующий лабораторией рекультивации почв ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (Новосибирск, Россия)

Сысо Александр Иванович – доктор биологических наук, заведующий лабораторией биогеохимии почв ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (Новосибирск, Россия)

Танасиенко Анатолий Алексеевич – доктор биологических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории почвенно-физических процессов ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (Новосибирск, Россия)

Убугунов Леонид Лазаревич – доктор биологических наук, профессор, директор ФГБУН Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН (Улан-Удэ, Россия)

Чевычелов Александр Павлович – доктор биологических наук, главный научный сотрудник отдела почвенных исследований Института биологических проблем криолитозоны – обособленного подразделения ФГБУН ФИЦ «Якутский научный центр СО РАН» (Якутск, Россия)

Шарков Иван Николаевич – доктор биологических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории агрохимии ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (Новосибирск, Россия)

Шпедт Александр Артурович – доктор сельскохозяйственных наук, член-корреспондент РАН, директор ФГБНУ ФИЦ «Красноярский научный центр СО РАН» (Красноярск, Россия)

Якутин Михаил Владимирович – доктор биологических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории биогеоценологии ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (Новосибирск, Россия)

Заведующая редакцией:

Наумова Наталья Борисовна – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории агрохимии ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (Новосибирск, Россия)

Ответственный секретарь:

Нечаева Таисия Владимировна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории агрохимии ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (Новосибирск, Россия)

Научный редактор:

Якименко Владимир Николаевич – доктор биологических наук, заведующий лабораторией агрохимии ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (Новосибирск, Россия)

Выпускающий редактор:

Гопп Наталья Владимировна – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории географии и генезиса почв ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (Новосибирск, Россия)

Журнал основан	в 2018 году
Варианты названия	Почвы и окружающая среда (Počvy i okružaišai sveda) / The Journal of Soils and Environment
Периодичность выпуска	4 номера в год
Вид и версия издания	Журнал, электронное сетевое
Сайт	https://www.soils-journal.ru
E-mail	redactor@soils-journal.ru
Регистрационный номер в Роскомнадзоре	ЭЛ № ФС 77-72325 – сетевое издание (Свидетельство от 14 февраля 2018 г.)
Номер ISSN	2618-6802 (online) (Свидетельство от 02 марта 2018 г.)
DOI-prefix	10.31251
Учредитель и издатель	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт почвоведения и агрохимии Сибирского отделения Российской академии наук (ФГБУН ИПА СО РАН)
Адрес учредителя и издателя	630090, Новосибирская область, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, д. 8/2, тел.: +7(383) 363-90-35

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ) и в Перечень изданий ВАК (с 15.06.2023 г.) по двум научным специальностям: 1.5.15. Экология (биологические науки), 1.5.19. Почвоведение (биологические науки).

© 2024 ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН

Scientific journal “**The Journal of Soils and Environment**” is devoted to distributing knowledge about the multifaceted relationships between soils and their environment, covering diverse aspects ranging from biotic to socio-cultural and economic ones. The journal invites to discuss urgent issues of soil science, agricultural chemistry and soil ecology, their conceptual breakthroughs and applied developments which can be used for environmental protection, agricultural production and in other sectors of economy.

EDITORIAL BOARD

Editor-in-Chief:

Vladimir A. Androkhov – Doctor of Biological Sciences, Director, Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (ISSA SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation)

Editors:

Maria I. Dergacheva – Doctor of Biological Sciences, Professor, Principal Researcher, Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (ISSA SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation)

Vladimir N. Yakimenko – Doctor of Biological Sciences, Head of the Laboratory, Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (ISSA SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation)

Members of the Editorial Board:

Evgeny V. Abakumov – Doctor of Biological Sciences, Professor, Saint Petersburg State University (SPbU, Saint Petersburg, Russian Federation)

Vasily S. Boyko – Doctor of Agricultural Sciences, Assistant Professor, Deputy Director for Research, Head Researcher, Omsk Agrarian Scientific Center (Omsk ASC, Omsk, Russian Federation)

Lubsan-Zondy V. Budazhapov – Corresponding member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Biological Sciences, Professor, Leading Researcher of the Department of New Technologies and Algorithms for the Development of the Arctic, Academy of Sciences Republic of Sakha (Yakutia, Russian Federation)

Gennady P. Gamzikov – Doctor of Biological Sciences, member of the Russian Academy of Sciences, Professor of Agrochemistry, Novosibirsk State Agrarian University (NSAU, Novosibirsk, Russian Federation)

Alexandra A. Golyeva – Doctor of Geographical Sciences, Head Researcher, Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences (IG RAS, Moscow, Russian Federation)

Sergey P. Kulizhsky – Doctor of Biological Sciences, Professor, Head of the Department of Soil Science and Soil Ecology of the National Research Tomsk State University, Vice-Rector for Social Affairs, (TSU, Tomsk, Russian Federation)

Sergey I. Kolesnikov – Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Head of the Department of Ecology and Nature Management, Southern Federal University (SFU, Rostov-on-Don, Russian Federation)

Alexander V. Puzanov – Doctor of Biological Sciences, Professor, Director, Institute for Water and Environmental Problems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IWEP SB RAS, Barnaul, Russian Federation)

Sergey N. Sedov – Candidate of Biological Sciences, Leading Researcher, National Autonomous University of Mexico Institute of Geology (UNAM, Mexico), Leading Researcher of the Federal Research Center "Tyumen Scientific Center of SB RAS" (Tyumen, Russian Federation)

Tatiana I. Siromlya – Doctor of Biological Sciences, Senior Researcher, Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (ISSA SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation)

Denis A. Sokolov – Doctor of Biological Sciences, Head of the Laboratory, Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (ISSA SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation)

Alexander I. Syso – Doctor of Biological Sciences, Head of the Laboratory, Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (ISSA SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation)

Anatoly A. Tanasienko – Doctor of Biological Sciences, Leading Researcher, Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (ISSA SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation)

Leonid L. Ubugunov – Doctor of Biological Sciences, Professor, Director, Institute of General and Experimental Biology of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IGEB SB RAS, Ulan-Ude, Russian Federation)

Alexander P. Chevychelov – Doctor of Biological Sciences, Head Researcher, Institute for Biological Problems of Cryolithozone of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IBPC SB RAS, Yakutsk, Russian Federation)

Ivan N. Sharkov – Doctor of Biological Sciences, Leading Researcher, Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (ISSA SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation)

Alexander A. Shpedt – Doctor of Agricultural Sciences, Assistant Professor, Director, Federal Research Center «Krasnoyarsk Science Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences» (Krasnoyarsk SC SB RAS, Krasnoyarsk, Russian Federation)

Mikhail V. Yakutin – Doctor of Biological Sciences, Assistant Professor, Leading Researcher, Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (ISSA SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation)

Head of the Editorial Board:

Natalia B. Naumova – Candidate of Biological Sciences, Leading Researcher, Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (ISSA SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation)

Executive Secretary:

Taisia V. Nechaeva – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (ISSA SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation)

Scientific Editor:

Vladimir N. Yakimenko – Doctor of Biological Sciences, Head of the Laboratory, Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (ISSA SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation)

Commissioning Editor:

Natalya V. Gopp – Candidate of Biological Sciences, Leading Researcher, Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (ISSA SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation)

The journal was launched	in 2018
Variants of the name	Почвы и окружающая среда (Počvy i okružajúšââ sreda) / The Journal of Soils and Environment
Publication frequency	Four issues per year
Website	https://www.soils-journal.ru
E-mail	redactor@soils-journal.ru
ISSN	2618-6802 (online)
DOI-prefix	10.31251
Founder and Publisher	Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Science (ISSA SB RAS)
Postal address	8/2 Akademik Lavrentiev avenue, Novosibirsk 630090, Russian Federation. Phon.: +7(383) 363-90-35

© 2024 Institute of Soil Science and Agrochemistry of SB RAS

Содержание

Генезис, экология и география почв

- Соболев Н.С., Герасимова М.И. Почвы островных баров Ольской лагуны Охотского моря e253
- Махатков И.Д., Смоленцев Б. А. Почвы авамской лесотундры (юго-западный Таймыр) e255

Органическое вещество и биохимия почв

- Ефремова Т.Т., Ефремов С.П., Аврова А.Ф. Сезонная активность анаэробной дегидрогеназы торфяных почв в связи с химическими факторами окислительно-восстановительной среды осушенных лесных болот e256
- Никонова Л.Г., Калашникова Д.А., Головацкая Е.А., Симонова Г.В. Запасы фитомассы и деструкция растений торфообразователей на начальных этапах разложения в условиях ненарушенных и постпирогенных торфяников Западной Сибири e258

Плодородие почв и минеральное питание растений

- Добротворская Н.И., Капустянчик С.Ю. Адаптационный потенциал культуры *Miscanthus* в условиях солонцового агроландшафта e247
- Наумова Н.Б., Нечаева Т.В., Русалимова О.А., Савенков О.А., Якименко В.Н. Продуктивность и качество клубней картофеля при внесении калия и магния на фоне азотно-фосфорных удобрений e268

Почвенно-физические процессы, свойства и режимы

- Кивалов С.Н., Курганова И.Н., Лопес Де Гереню В.О., Мякшина Т.Н., Сапронов Д.В., Хорошаев Д.А. Применение ансамбля T&P-моделей для оценки дыхания лесных почв в зоне умеренно-континентального климата e252
- Ходжаева А.К., Масликова С.В., Горбунова Н.С. Сравнительная оценка методов седиментометрии при определении гранулометрического состава почв e260

Деградация, рекультивация и мелиорация почв

- Скотарева А.Е., Иванов Н.А., Соколов Д.А. Оценка факторов, определяющих скорость и направленность развития растительных сообществ на отвалах отходов добычи угля (на примере Горловского антрацитового месторождения) e259

Биогеохимия загрязнение и ремедиация объектов окружающей среды

- Игловский С.А., Баженов А.В., Яковлев Е.Ю. Пространственное распределение ^{137}Cs , ^{40}K , ^{226}Ra и ^{232}Th в почвах г. Мончегорска (Мурманская область) e264
- Барсуков П.А., Русалимова О.А. Влияние противогололёдных реагентов на свойства почв придорожных газонов г. Новосибирска e265

Поведение почв и экосистем в пространстве и во времени

- Хохлова О.С., Мякшина Т.Н., Моргунова Н.Л., Файзуллин А.А. Палеопочвы бронзового века в степной зоне Южного Приуралья в решении задач палеопочвоведения и археологии (на примере памятника Ташла IV в Оренбуржье) e254

Contents

Soil Genesis, Ecology and Geography

Sobolev N.S., Gerasimova M.I. Soils of the island bars of the Ola lagoon (Okhotsk sea) e253

Makhatkov I.D., Smolentsev B.A. Soils of the Avam forest-tundra (Southwestern Taimyr) e255

Soil Organic Matter and Biochemistry

Efremova T.T., Efremov S.P., Avrova A.F. Seasonal activity of anaerobic dehydrogenase of peat soils as related with some chemical factors of the redox environment of drained forest mires e256

Nikonova L.G., Kalashnikova D.A., Golovatskaya E.A., Simonova G.V. Phytomass reserves and degradation of peat-forming plants at the first stages of decomposition in natural and post-pyrogenic peatlands of West Siberia e258

Soil fertility and mineral nutrition of plants

Dobrotvorskaya N.I., Kapustyanchik S.Y. Adaptation potential of *Miscanthus* in a solonetz agricultural landscape e247

Naumova N.B., Nechaeva T.V., Rusalimova O.A., Savenkov O.A., Yakimenko V.N. Potato tuber yield and quality under potassium and magnesium addition on top of the nitrogen and phosphorus fertilization e268

Soil Physical Processes, Properties and Regimes

Kivalov S.N., Kurganova I.N., Lopes De Gerenyu V.O., Myakshina T.N., Sapronov D.V., Khoroshaev D.A. Application of the ensemble of T&P models for estimating the respiration of forest soils in the zone of temperate continental climate e252

Khodzhaeva A.K., Maslikova S.V., Gorbunova N.S. Comparative assessment of gravitational sedimentation methods for the evaluation of particle-size distribution in soils e260

Soil Degradation, Recultivation and Melioration

Skotareva A.E., Ivanov N.A., Sokolov D.A. Assessment of factors determining the rate and direction of plant communities development on coal mining spoils (the case study of the Gorlovskoye anthracite deposit) e259

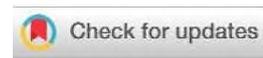
Environment Biogeochemistry, Pollution and Remediation

Iglovsky S.A., Bazhenov A.V., Yakovlev E.Y. Spatial distribution of ^{137}Cs , ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th in soils of Monchegorsk city (Murmansk region) e264

Barsukov P.A., Rusalimova O.A. The effect of deicing reagents on soil properties of the roadside lawns in Novosibirsk e265

Soil and Ecosystem Behaviour in Time and Space

Khokhlova O.S., Myakshina T.N., Morgunova N.L., Fayzullin A.A. Bronze age paleosols in the steppe area of the Southern Cis-Urals in solving the problems of paleopedology and archaeology (a case-study of the Tashla IV site in the Orenburg region) e254



Почвы островных баров Ольской лагуны Охотского моря

© 2024 Н. С. Соболев ^{1,2}, М. И. Герасимова ^{1,2}

¹ФГБОУ ВО Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Ленинские горы, д. 1, г. Москва, 119991, Россия. E-mail: kolyhome2000@yandex.ru; maria.i.gerasimova@gmail.com

²ФГБНУ ФИЦ Почвенный институт имени В.В. Докучаева, Пыжжевский пер., д. 7, стр. 2, г. Москва, 119017, Россия

Цель исследования. Выявить специфику почвообразования на островных барах Ольской лагуны Охотского моря, обусловленную суровым климатом, динамичностью и молодостью ландшафтов, влиянием морских колониальных птиц.

Место и время проведения. Полевые исследования проводились в июне-июле 2022 года в прибрежной зоне Ольской лагуны в Магаданской области; камеральные – в 2022 и 2023 гг.

Методы. Методы включали маршрутные наблюдения с описанием почвенных профилей, мезоморфологические исследования; физико-химические анализы: кислотность почвы ($pH_{вод}$), электропроводность (TDS), потери при прокаливании (ППП); дешифрирование снимков и составление почвенных карт.

Основные результаты. Диагностированы почвы баров как сухоторфяно-литоземы, различающиеся мощностью сухоторфяного горизонта Т₁ и степенью его скелетности. Показано, что сухоторфяный горизонт постепенно переходит в породу – плотный морской галечник, который встречается иногда в сухоторфяном горизонте благодаря штормовым «набросам» с моря. Установлено, что горизонт Т₁ состоит из остатков мезофильных растений, морфонов тёмного тонкодисперсного вещества и большого количества полуразложившихся и живых корней, проникающих в галечник.

Заключение. Формирование сухоторфяно-литоземов с профилем Т₁-(Т₁/С)-С определяется холодным морским климатом и однообразием вейниково-колосняковых лугов. Основными факторами, влияющими на свойства почв, являются динамичность баров, специфика галечника как почвообразующей породы, импัลверизация солей и функционирование колоний морских птиц. Исследования расширяют знания о малоизученных почвах региона и могут быть использованы для обоснования их положения в классификации почв России; кроме того, они полезны в формате устойчивого развития, так как данные территории являются местом гнездования морских колониальных птиц.

Ключевые слова: Северное Охотоморье; сухоторфяный горизонт; океанические луга; динамичность ландшафтов; галечник; морские колониальные птицы.

Цитирование: Соболев Н.С., Герасимова М.И. Почвы островных баров Ольской лагуны Охотского моря // Почвы и окружающая среда. 2024. Том 7. № 2. е253. DOI: [10.31251/pos.v7i2.253](https://doi.org/10.31251/pos.v7i2.253).

ВВЕДЕНИЕ

Почвенный покров северного Охотоморья относительно слабо изучен в силу малой доступности территории и распространённости маломощных горных почв на плотных породах. На мелкомасштабных картах (Почвенная карта РСФСР, 1988; Почвенная карта Магаданской области, 1990; Почвенная карта Северо-Востока Евразии, 1993) на крутых склонах показаны подзолы и подбуры, в том числе с сухоторфяным горизонтом в соответствии с общими почвенно-географическими закономерностями. Формирование сухоторфяного горизонта обеспечивается прохладным и влажным климатом региона, но без переувлажнения почв, в сочетании с широким распространением мезофильных видов растений (Иванов и др., 2009; Иванов А.Н., Иванов А.В., 2020). Мощность профилей подзолов и подбуров редко превышает полметра, а их альфегумусовые горизонты определяются как иллювиально-гумусовые – ВНФ (Классификация ..., 2004; Полевой ..., 2008; Урусевская и др., 2019).

Почвы островных песчано-галечниковых баров в северном Охотоморье совсем не изучены; они показаны на тех же мелкомасштабных картах как подзолы охристые, в том числе надмерзлотно-глееватые, подбуры таёжные сухоторфянистые сухомерзлотные. Островные бары отличаются почвообразующими породами – галечниками, с участками песков; почти плоским ровным рельефом с превышениями над уровнем моря не более 5 м и растительностью – колосняково-вейниковыми лугами. В глобальных схемах зональности (Физико-географический ..., 1964; Географические пояса ..., 1988) бары похожи по растительности на океанические субполярные или субарктические луга,

однако имеются различия в климате. Почвы океанических лугов были названы дерново-гумусовыми или дерново-торфянистыми (Физико-географический ..., 1964; Глазовская, 1972). В классификации почв России (Классификация ..., 2004; Полевой ..., 2008) подобные почвы были отнесены к отделу органо-аккумулятивных.

Почвы баров испытывают сильное влияние моря: кроме импัลверизации морских солей, в весенний и осенний периоды штормов морская вода может поступать даже в центральные части баров; часто происходят забросы песка и гальки на поверхность. Влияние колоний морских птиц на ландшафты баров более заметно по сравнению с другими прибрежными территориями Охотоморья, так как колонии морских птиц занимают всю поверхность исследуемых баров. Уникальная особенность островных баров – их динамичность, выражающаяся в процессах смыва, намыва и набросов песчано-галечного материала, обуславливает особые черты почвообразования: смывы разрушают почву и уносят целые горизонты или их фрагменты в море. Намывы, напротив, создают пространство для «потенциальных» почв. Набросы увеличивают скелетность верхних горизонтов и, при большой интенсивности, приводят к погребению почв галечным материалом, который может стать почвообразующей породой для новой почвы.

Целью наших исследований было выявить специфику почвообразования на островных барах Ольской лагуны Охотского моря, обусловленную суровым климатом, динамичностью и молодостью ландшафтов, влиянием морских колониальных птиц.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследования послужили почвы островных баров Ольской лагуны (рис. 1).

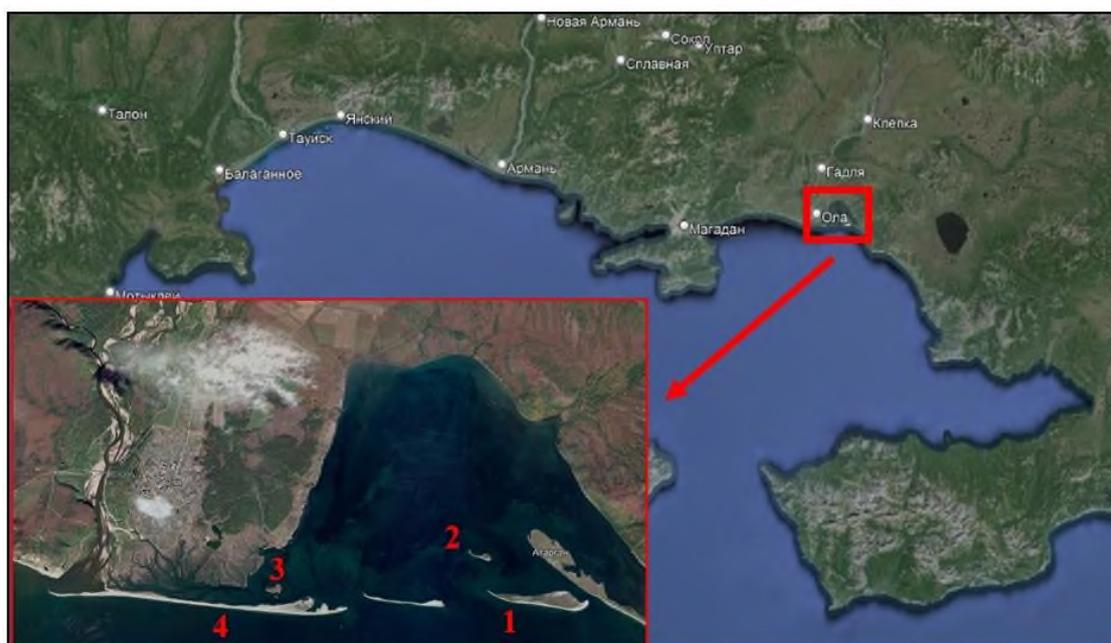


Рисунок 1. Объекты исследования в Ольской лагуне: 1 – кошка¹ Уратамлян, 2 – остров Сиякал, 3 – остров Сикулун, 4 – Нюклинская коса. Источник: Google Earth.

Лагуна представляет собой водоём площадью около 30 км², являющийся частью Тауйской губы Охотского моря. С юга лагуна ограничена островными барами, которые состоят из морских галечников (Государственная геологическая ..., 2016, лист О-56-II). Менее распространены пески и суглинки, переслаивающиеся с плотными галечниками.

Островные бары Ольской лагуны имеют слабопологоволнистый рельеф. Высота над уровнем моря не превышает 5 м. Островные бары являются динамичными системами, зависящими от речного и морского течений в лагуне, что проявляется в постоянных смывах, намывах и набросах субстрата. На песчано-галечниковом намывном субстрате формируются новые почвы; смывы разрушают почву,

¹ Термин "Кошки" употребляется в прибрежных районах арктических и дальневосточных морей России и означает песчаные или галечниковые отмели на взморье, обнажающиеся при отливе (Ахромеев, 2002).

остатки которой иногда выбрасываются на бары (рис. 2). Очевидно, что наиболее динамичны побережья. Изучение спутниковых снимков Ольской лагуны за разные года позволяет сделать вывод, что в период 1972–1999 гг. преобладали намывы, однако в период 1999–2023 гг. доминировали смывы (рис. 3).



Рисунок 2. Смытый и впоследствии наброшенный волнами фрагмент сухоторфяного горизонта (Точка Ур-5). Фотография Н.С. Соболева.

Река Ола, одна из крупных рек Магаданской области, сильно влияет на течение и солёность воды в лагуне. Раньше река впадала в лагуну, а ее устьевая часть длиной около 5 км отделялась Ньюклинской косой от морской акватории. В результате катастрофических летних паводков 2006 г. образовался прорыв в проксимальной части косы, вызвавший активизацию приливных и отливных течений в лагуне, следовательно, процессов смыва, намыва и набросов галечно-песчаных отложений баров (Хорева и др., 2016). В целом, за исследованный период 1972–2023 гг. процессы смыва оказались равны процессам намыва, что говорит о балансе в системе. Динамичность островных баров влияет на время жизни почв и конфигурацию самих баров. Можно предположить, что петроземы успевают развиваться в литоземы, однако процессы смыва не позволяют им развиваться дальше в сухоторфяные почвы. Намывы не допускают уничтожение почвенного покрова целиком и обеспечивают условия для формирования на барах псаммоземов и петроземов, которые успевают развиваться в литоземы. Благодаря данным, полученным с помощью спутниковых снимков, можно утверждать, что большинство почв островных баров возникло в период 1972–1999 и 2004–2009 гг.

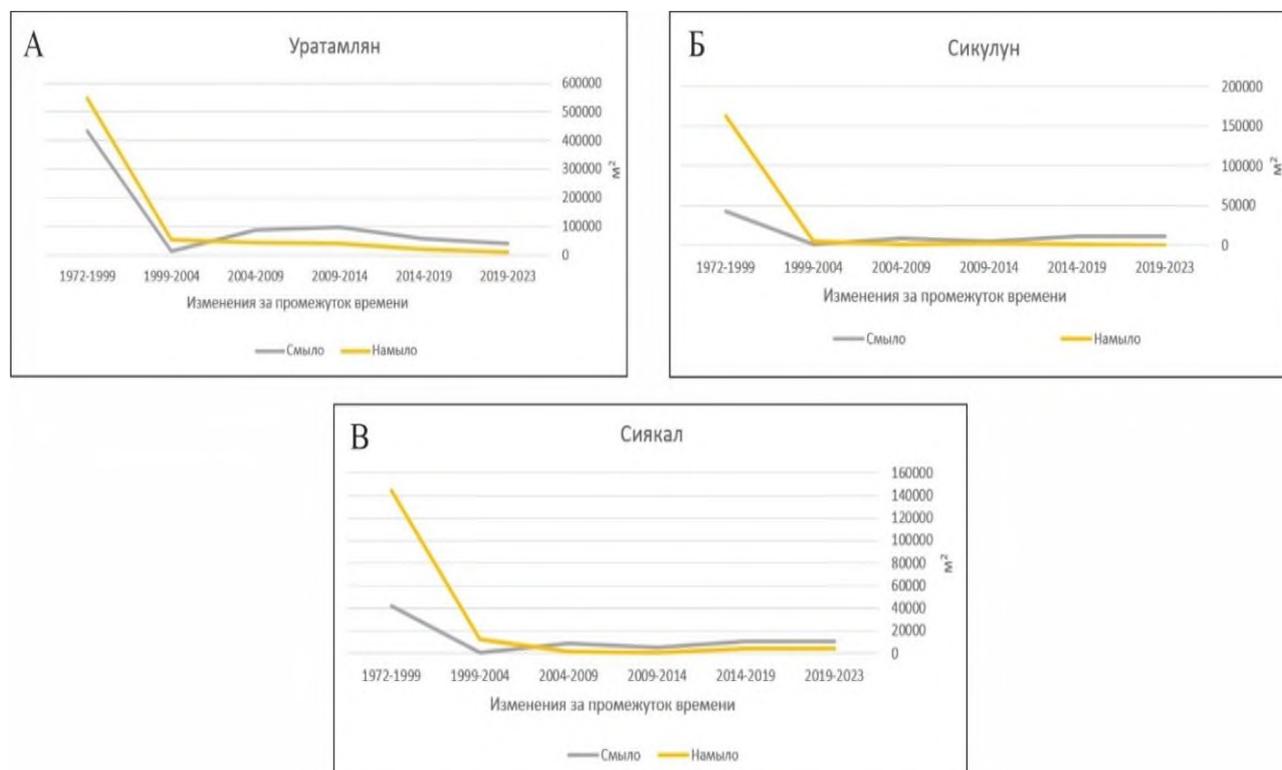


Рисунок 3. Динамика смывов и намывов за период 1972–2023 гг.: А – Кошки Уратамлян; Б – Остров Сикулун; В – Остров Сиякал. Примечание: высокие значения за период 1972–1999 гг. обусловлены тем, что они посчитаны за 27 лет, а не за 5 лет как в остальных периодах.

Ещё одним проявлением динамичности являются набросы песчано-галечного материала с моря в период весенне-осенних штормов, которые непосредственно влияют на скелетность верхних горизонтов, а также на присутствие в них частиц песка. Наиболее сильные набросы полностью погребают и консервируют почвы, образуя пятна и полосы белой гальки на поверхности бара (рис. 4); набросанный галечный материал может стать почвообразующей породой для новой почвы.

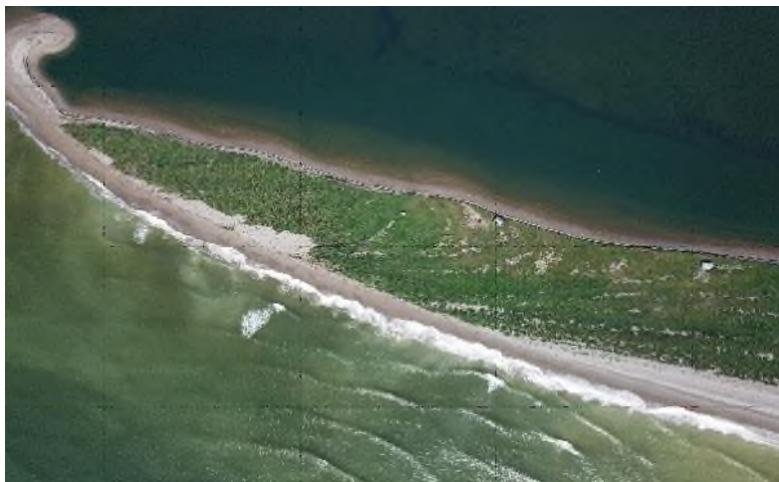


Рисунок 4. Набросы галечного материала в центральной части кошки Уратамлян. Фотография с дрона сделана М.Г. Хоревой, август 2022 г.

Климат оценивается как холодный, временами избыточно влажный, умеренный морской по Б.П. Алисову (1956). Средняя температура августа составляет +13 °С, января – -16 °С; среднегодовая температура воздуха – -1,8 °С; годовая сумма осадков – 376 мм (Weather Spark, дата обращения 18.02.2024). Акватория Охотского моря оказывает сглаживающее воздействие на ход годовых температур; влажность воздуха остаётся высокой и составляет 77%. В Ольской лагуне имеет место выхолаживающий эффект, обусловленный более длительным периодом сохранения ледового покрова в лагуне по сравнению с прибрежными территориями (Ушаков, 2022).

На островах и кошках Ольской лагуны М.Г. Хорева с соавторами (2016) выделили пять растительных сообществ:

1) Разреженное пионерное луговое сообщество с участием галофитов, формирующееся на недавно образованных галечниках и штормовых набросах песка и гальки. Типичные представители: мертензия приморская (*Mertensia maritima*), крестовник ложноарниковый (*Senecio pseudoarnica*).

2) Приморский луг разнотравно-бескильницевого или бескильницевого занимает небольшие по площади понижения с галечно-илистым грунтом, подтопляемые высокими приливами. Типичные представители: бескильница ползучая (*Puccinellia phryganoides*), лебеда Гмелина (*Artiplex Gmelinii*) – растения, выдерживающие засоление почв.

3) Луг разнотравно-колосняковый – доминирует колосняк мягкий (*Leymus mollis*), распространён повсеместно.

4) Луг разнотравно-вейниковый – доминирует вейник Лангсдорфа (*Calmagrostis Langsdorfii*), распространён повсеместно.

5) Тундра разнотравно-кустарничковая – доминирует шикша (*Empetrum androgynum*). Тундровая растительность развивается на наиболее стабильных и старых частях баров.

Рассмотренные сообщества по приуроченности к основным элементам баров объединяются в три группы: (1) галофитные, относящиеся к узкой засоленной прибрежной полосе, (2) тундровые – приуроченные к старым, без влияния птиц частям баров и имеющие весьма ограниченное распространение, (3) разнотравно-злаковые луга, относящиеся к основной поверхности бара.

На состав растительных ассоциаций и почвы сильное влияние оказывают крупные колонии чайки тихоокеанской (*Larus schistisagus*), существующие на островных барах более 30 лет. Оно заключается в выпадении нитрофобных видов (например, шикша) из состава растительных ассоциаций (Зеленская, 2013).

Наиболее детальные исследования почв и почвенного покрова проводились нами на четырёх объектах, различающихся размерами и степенью орнитогенной нагрузки (табл. 1, рис. 1).

Таблица 1

Характеристика территорий исследования

Основные характеристики	Кошка Уратамлян	Остров Сиякал	Остров Сикулун	Ньюклинская коса
Координаты	59°33'27" с.ш. 151°26'7" в.д.	59°33'56" с.ш. 151°24'36" в.д.	59°33'37" с.ш. 151°20'17" в.д.	59°33'25" с.ш. 151°20'40" в.д.
Площадь, га*	37,08	3,42	3,24	–
Почвообразующие породы	Галька, песок			Песок
Растительность (сообщества)	Колосняковый луг	Колосняковый кочкарник	Вейниково-деренный луг	Колосняковый луг
Преобладающие почвы	Сухоторфяно-литоземы, псаммоземы	Литоземы перегнойные	Сухоторфяно-литоземы, литоземы грубогумусовые	Псаммоземы
Плотность птиц, шт./га	1689	2841	376	–

Примечание.

* – площадь приведена по данным на лето 2022 г. Прочерк означает отсутствие точной информации.

Методы исследования включали маршрутные наблюдения с описанием почвенных профилей, мезоморфологические наблюдения на базе Центра коллективного пользования «Лаборатория радиоуглеродного датирования и электронной микроскопии» ИГ РАН. Спутниковые снимки Landsat взяты нами из открытого источника с сайта Геологической службы США (USGS, дата обращения 07.04.2024). Анализ снимков проводили в QGIS. Физико-химические анализы выполнены в эколого-геохимическом центре географического факультета МГУ. Актуальную кислотность почвы ($pH_{вод}$) измерили потенциометрическим методом на pH-метре «ЭКСПЕРТ-pH»; электропроводность (TDS, как показатель количества легкорастворимых солей) – кондуктометром «SevenEasy S30» фирмы MettlerToledo при соотношении почва : вода равным 1:25 для органических горизонтов и 1:5 для минеральных. Потерю при прокаливании (ППП) в сухоторфяных горизонтах определили в соответствии с ГОСТ 11306-2013; элементный состав – рентгенофлуоресцентным методом с помощью портативного рентгено-флуоресцентного анализатора «ДЕЛЬТА ПРОФЕССИОНАЛ ЭКСПЛОРЕР» «OlympusInnov-X" SDD 25», США, в режиме «Геохимия».

Фотографии на рис. 5–12 сделаны Н.С. Соболевым.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Почвы основной поверхности баров представлены сухоторфяно-литоземами (рис. 5) с профилем: сухоторфяный горизонт TJ, переходный TJ/R и плотная почвообразующая порода R на глубине не больше 30 см (Классификация ..., 2004; Полевой ..., 2008).



Рисунок 5. Профиль сухоторфяно-литозема (Разрез Ур-1).



Рисунок 6. Ясная граница между сухоторфяным горизонтом и почвообразующей породой (Разрез Н-5).

К характерным чертам почвенного профиля, кроме диагностического горизонта Т₁, относятся: особая почвообразующая порода – морская галька, иногда с небольшой примесью песка, залегающая плотными слоями; размер гальки варьирует от 1 до 10 см, в среднем – 5 см (Соболев, Герасимова, 2023). Переходный к породе горизонт в литоземах обычно представляет собой щелнисто-мелкоземистый элювий плотных пород (Классификация ..., 2004; Полевой ..., 2008). В нашем случае переходный горизонт состоит из умеренно плотной массы живых и отмерших корней колосняка и/или вейника, сгустков тёмного тонкодисперсного материала и гальки, занимающей более половины массы горизонта; горизонт имеет ясную нижнюю границу (рис. 6).

Сухоторфяные горизонты по критериям российской классификации почв представляют собой органический материал, состоящий из остатков мезофильных видов растений (рис. 7), формирующийся в условиях влажного холодного климата (Классификация ..., 2004; Полевой ..., 2008). Факторы почвообразования в Тауйской губе полностью соответствуют этим критериям. Средняя мощность сухоторфяного горизонта – 12 см; ППП составляют в среднем 70% (табл. 2).



Рисунок 7. Сухоторфяный горизонт под микроскопом (Разрез Ур-3).

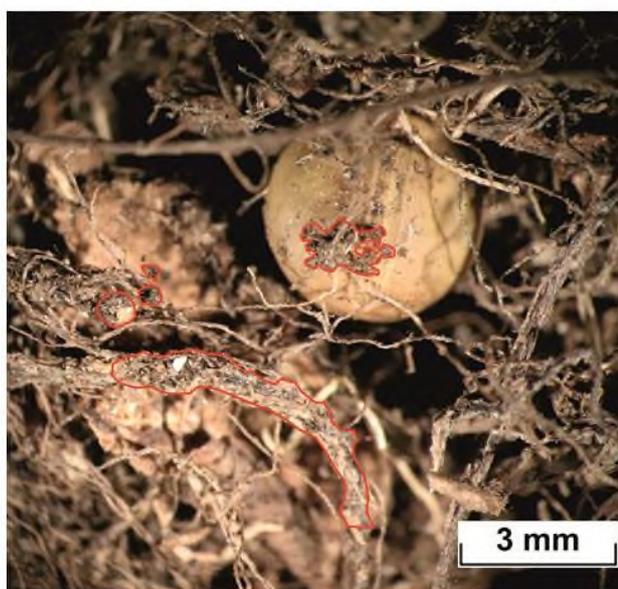


Рисунок 8. Сухоторфяный горизонт под микроскопом (Разрез Ур-1). Примечание: красным цветом выделены чёрные сгустки



Рисунок 9. Галька с железисто-гумусовой кутаной (Разрез Ур-1).

Мезоморфологическими наблюдениями были выявлены некоторые детали строения горизонтов Т₁. Наименее разложенные растительные остатки – фрагменты стеблей и корней колосняка и вейника, иногда с мелкими чистыми песчаными зёрнами разнообразного минералогического состава. Диаметр наиболее крупных растительных остатков достигает 3 мм (рис. 7). Мелкие растительные остатки (1–50 мкм) имеют нитевидную форму и пронизывают тонкодисперсный материал тёмного цвета в виде отдельных сгустков и их скоплений с минеральными зёрнами в них (рис. 8). На рисунке 7 хорошо виден крупный растительный остаток с сохранившимся строением; показанное на рисунке 8 минеральное зерно отличается очень высокой степенью окатанности. По-видимому, сгустки представляют собой остатки разнотравья и листьев злаков с лучшей степенью разложения, по сравнению с корнями, среди которых есть и живые. На некоторых остатках корней находятся такие же почти чёрные сгустки. Отмечается наличие почвенной мезофауны – при полевом обследовании были обнаружены многоножки и личинки жуков. В зависимости от деталей строения сухоторфяных горизонтов или наличия другого верхнего горизонта выделяются разные варианты литоземов.

Среди сухоторфяных горизонтов встречаются такие, где часть растительных остатков сильно разложена и сочетается со сгустками или морфонами тёмного тонкодисперсного материала. Таким горизонтам в дополнение к основному индексу Т_Т присваивался индекс признака h – перегнойный. Средняя мощность горизонта составляет 5 см. Почвы классифицировались, как сухоторфяно-литоземы перегнойные (рис. 10, А). В условиях более высокой биологической активности и большего увлажнения развиваются литоземы перегнойные. Они включают слой средней мощностью 5 см, относительно тёмного гумусированного мажущегося материала с обильными включениями растительных остатков и гальки, переходящий в почвообразующую породу. ППП составляет в среднем 63%.

Таблица 2

Основные морфологические и физико-химические свойства почв

Индекс	Почва	Формула профиля*	Мощность, см	pH	TDS, (µS/cm)	ППП, %	P _{общ.} , %	Годы начала формирования профиля*
Кошка Уратамлян								
Ур-1	Сухоторфяно-литозем на галечнике, подстилаемом песком	Т_Т-R-D	15	6,15	468	72,47	0,10	1999-2004
Ур-2	Сухоторфяно-литозем на галечнике	Т_Т-Т_Т/R-R	7	7,50	1224	70,68	0,53	1999-2004; 2004-2009
Ур-3	Сухоторфяно-литозем перегнойный на галечнике	Т_Т_h-Т_Т_h/R-RO	4	6,62	350	80,03	0,05	1972-1999
Ур-4	Сухоторфяно-литозем перегнойный на галечнике	Т_Т-Т_Т/R-R	7	6,28	688	74,52	0,09	2004-2009
Ур-5	Сухоторфяно-литозем на галечнике «останец»	Т_Т-R-D	20	6,50	1123	73,78	0,06	2004-2009; 2019-2023
Ур-6	Сухоторфяно-литозем на галечнике	Т_Т-Т_Т/R-R	27	5,48	967	70,68	0,17	2009-2014
Ур-7	Псаммозем на погребенном сухоторфяно-литоземе	О/С-С-С/[Т_Т]-[Т_Т]	6	6,50	51	3,75	0,11	1999-2004
Ур-8	Псаммозем на погребенном сухоторфяно-литоземе	О-О_h-С-С/[Т_Т]-[Т_Т]	2	7,04	109	15,73	0,10	1972-1999
Остров Сияжал								
С-1	Перегнойно-сухоторфяный литозем на песке	Н_{Т_Т}-Т_Т-С	5	6,95	954	52,67	0,17	Раньше 1972
С-2	Литозем дернинно-перегнойный на галечнике, подстилаемым песком	Orz-Н-R-D	5	5,61	304	73,64	0,06	Раньше 1972
С-3	Петрозем корочковый на галечнике	Корочка-R_{Т_Т}-R	0,5	7,87	1282	40,66	0,81	1972-1999; 2004-2009
С-4	Литозем перегнойный корочковый на галечнике	Корочка-Н_{Т_Т}-R_{Т_Т}-R	0,5	7,78	1276	54,18	0,40	1999-2004; 2004-2009
Нюклинская коса								
Н-1	Псаммозем	О-С	3	6,50	345	85,79	0,07	–
Н-2	Псаммозем	О-О/С-С	1	6,34	144	87,6	0,04	2009-2014
Остров Сикулун								
Н-3	Сухоторфяно-литозем корочковый	Корочка-Т_Т-R	0,5	5,60	935	46,86	0,10	–
Н-4	Сухоторфяная аллювиальная	Т_Т-С-D-Dg-R	8	5,86	254	62,77	0,04	1972-1999
Н-5	Сухоторфяно-литозем на галечнике	Т_Т-Т_Т/R-R	12	4,82	188	82,03	0,08	1972-1999
Н-6	Литозем грубогумусовый на галечнике	О-АО-R	16	7,32	173	29,88	0,15	1999-2004; 2004-2009
Н-7	Сухоторфяно-литозем на галечнике	Т_Т-R	12	6,35	241	84,17	0,10	1999-2004; 2004-2009
Н-8	Сухоторфяно-литозем деградированный на галечнике	Т_Т/R-R	10	5,31	852	67,64	0,10	1972-1999

Примечание.

* – полужирным шрифтом выделены горизонты, к которым относятся аналитические данные. Представлены такие свойства почв как кислотность (pH_{вод}), электропроводность (TDS), потери при прокаливании (ППП), общее содержание фосфора (P_{общ.}). Прочерк в годах означает отсутствие информации.

Литоземы грубогумусовые (рис. 10, Б) характеризуются более активным процессом разложения органического вещества с образованием грубого гумуса, а также существенной долей минерального материала. Вместо сухоторфяного и перегнойного слоёв формируется грубогумусовый горизонт АО, мощностью в среднем 15 см; pH_{вод} составляет 7,3, ППП варьируют около 30%. Механизм

образования грубогумусового горизонта до конца неясен, возможно, он связан с локальным ослаблением выхолаживающего эффекта. В наименее благоприятных условиях на островных барах Ольской лагуны встречаются слаборазвитые почвы: *псаммоземы* на песках (рис. 10, В) и *петроземы* на галечнике, имеющие только маломощный горизонт О (в среднем 4 см), состоящий из слаборазложившихся остатков злаков; ППП = 90%. В некоторых горизонтах присутствовали вкрапления гумусированного материала. Отдельно стоит отметить псаммоземы на кошке Уратамлян, которые развиваются на погребённых сухоторфяно-литоземах, перекрытых песчаным набросом во время штормов. Под песчаной толщей находятся остатки сухого торфа вперемешку с галькой разного размера.

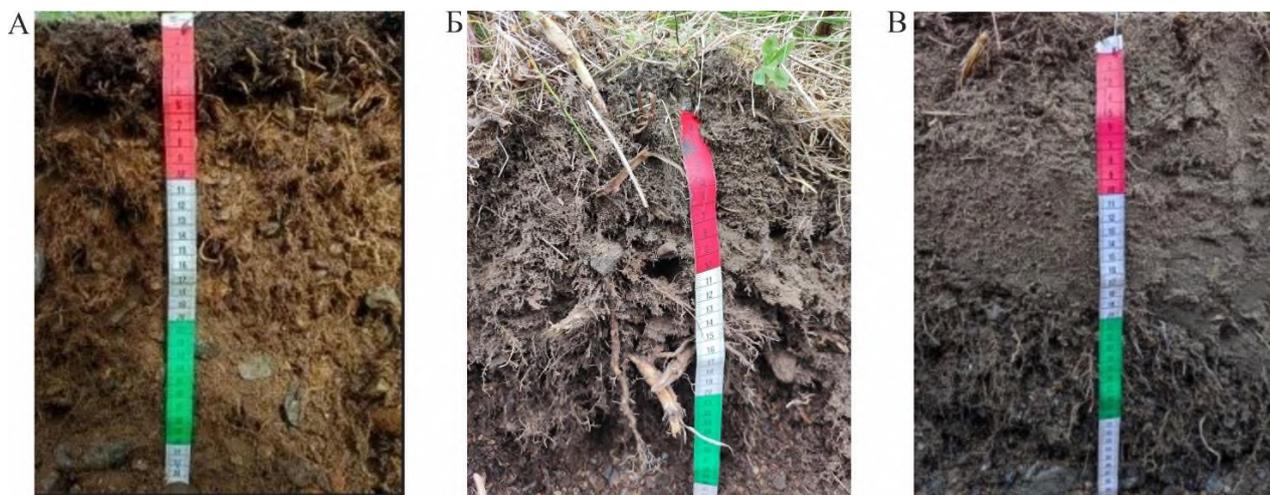


Рисунок 10. Профили почв: А – перегнойный-сухоторфяный литозем (Разрез С-1); Б – литозем грубогумусовый (Разрез Н-6); В – псаммозем на погребенном сухоторфяно-литоземе (Разрез Ур-8).

Сухоторфяные аллювиальные почвы отсутствуют в классификации почв России (Полевой ..., 2008). Они состоят из сухоторфяного горизонта мощностью не больше 10 см, на аллювии со слоями разного гранулометрического состава. Нижний минеральный горизонт бывает оглеен. В Ольской лагуне встречаются крайне редко (только на острове Сикулун, в месте, где до прорыва 2006 г. находилось основное устье р. Ола) и малыми ареалами. Иногда на поверхности гальки в нижней части профиля обнаруживались фрагментарные тонкие гумусово-железистые кутаны (рис. 9). Они свидетельствуют о минимальных проявлениях альфегумусового процесса, ограниченного не только временем жизни почвы, но и значениями $pH_{вод}$: до 7,8, в среднем 6,4 (табл. 2).

Значения $pH_{вод}$ в верхних горизонтах литоземов однообразны и колеблются около 6; по профилю изменяются слабо. В большинстве профилей присутствует небольшое повышение значений в почвообразующих породах. Выделяются верхние горизонты с величинами $pH_{вод}$ больше 7, в них также повышено содержание легкорастворимых солей ($TDS > 900-1200 \mu S/cm$). Соли могут быть связаны с поступлением с моря, как в набросах, так и путем импультверизации. Однако существует мнение, что верхние горизонты почв под колониями чаек подщелачиваются (Плещенко, 1992; Жарикова, 2020; Бреслина, 1987) и засоляются (Иванов и др., 2009; Domínguez et al., 2017) за счёт их помёта, что частично подтверждается нашими данными. Высокое содержание фосфора считается характерным для птичьих базаров (Иванов и др., 2008; Абакумов, 2014; Жарикова, 2020; Елпатьевский, Таргульян, 1985; и др.); в почвах Ольской лагуны оно отмечается в корочках – свежем помёте.

Основными факторами дифференциации почвенного покрова баров Ольской лагуны являются: выхолаживающий эффект, динамичность островных баров и влияние колоний морских колониальных птиц. Выхолаживающий эффект обуславливает формирование сухоторфяных горизонтов, вместо гумусовых, распространённых на соседних территориях. Локальные ослабления выхолаживающего эффекта приводят к формированию грубогумусовых горизонтов на территории баров.

Морские колониальные птицы, чьи колонии находятся на барах, оказывают определённое влияние, как на физико-химические, так и на морфологические свойства почв, в первую очередь, сухоторфяного горизонта – он подщелачивается помётом чаек. Среднее значение $pH_{вод}$ в горизонтах

почв под колониями птиц составляет 6,4, по сравнению с фоновыми участками со средней величиной $pH_{\text{вод}}$ 4,9. В местах колоний увеличиваются значения TDS в 3–6 раз, достигая 1000–1200 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Также происходит увеличение содержания биофильных элементов, прежде всего, азота и фосфора (в 10–20 раз; табл. 2), что приводит к усилению микробиологической активности и, как следствие, к формированию относительно тёмных сгустков гумусированного мажущегося тонкодисперсного материала.

Влияние птиц на морфологические признаки почв обусловлено поведенческой особенностью чаек: постоянное хождение по гнездовой территории по определённым маршрутам (Зеленская, 2013). В результате, образуются тропы, на них почти пропадает растительность и переуплотняется поверхность сухоторфяного горизонта. Растения между тропами формируют органогенную кочку благодаря подкормке биофильными элементами из помёта чаек (рис. 11).



Рисунок 11. Вид на колонию чайки тихоокеанской на кошке Уратамлян.



Рисунок 12. Орнитогенная корочка под микроскопом (Разрез С-4).

В местах наиболее интенсивного влияния происходит формирование орнитогенных корочек из гуано птиц мощностью до 5–10 мм. Они имеют серовато-белёсый цвет и пористую структуру (рис. 12); со временем они разрушаются, но «скрепляют» отдельные участки сухого торфа.

ВЫВОДЫ

1. Влажный холодный климат и характер растительности – океанических злаковых лугов – определяют преобладание почв с сухоторфяным горизонтом, что не противоречит зональным схемам. Сухоторфяные горизонты состоят из остатков мезофильных видов растений, прежде всего, злаков и густо пронизаны их корнями. Процесс гумификации органического материала проявляется в формировании отдельных сгустков тёмного тонкодисперсного материала, частично вблизи корневых остатков. Горизонты имеют высокую степень скелетности из-за гальки, которая поступает в почвенный профиль посредством набросов с моря во время штормов.

2. Преобладающими почвами баров являются сухоторфяно-литоземы на плотных галечниках с профилем TJ–TJ/R–R.

3. Динамичность условий почвообразования – смывы, намывы и набросы гальки определяет молодость почв. Проведённое сравнение разновременных снимков баров позволяет предположить, что большинство сухоторфяно-литоземов возникли между 1972 и 2009 годами.

4. Признаков альфегумусового процесса, предполагавшегося на основе информации с мелкомасштабных карт, в профилях почв баров практически не было обнаружено, что объясняется малым возрастом почв и составом поступающих в почву растительных остатков, хотя его минимальные проявления иногда отмечались при мезо-морфологических исследованиях.

5. Близкие к нейтральным значения $pH_{\text{вод}}$ могут объясняться подщелачиванием почвы за счёт помёта чаек в местах их колоний, а также импульверизацией солей с моря.

6. Влияние морских колониальных птиц на почвы проявляется в уплотнении верхних горизонтов и формировании органогенных кочек, а также в изменениях физико-химических свойств почв. Птицы вносят большое количество биофильных элементов, подщелачивают верхние горизонты на 1–2 единицы $pH_{вод}$ и увеличивают значения электропроводности в 3–6 раз по сравнению с фоновыми.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность сотрудникам Института биологических проблем Севера Дальневосточного отделения Российской академии наук (Магадан) М. Г. Хоревой и Л. А. Зеленской за помощь в проведении полевых работ и предоставлении фотографий с дрона, а также сотруднику Института географии Российской академии наук (Москва) Ю. В. Конопляниковой за помощь в проведении мезоморфологического анализа.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена при финансовой поддержке МГУ имени М.В. Ломоносова как часть производственной практики студентов 3 курса кафедры геохимии ландшафтов и географии почв географического факультета и темы НИР № 1.4 «Антропогенная геохимическая трансформация компонентов ландшафтов».

ЛИТЕРАТУРА

- Абакумов Е.В. Зоогенный педогенез как основной биогенный почвенный процесс в Антарктиде // Русский орнитологический журнал. 2014. Экспресс-выпуск № 972. С. 576–584.
- Алисов Б.П. Климаты СССР. Москва: Изд-во МГУ, 1956. 128 с.
- Ахромеев Л.М. Геоморфологический словарь-справочник / П.Г. Шевченкова (ред.). Брянск: Брянский государственный университет, 2002. 320 с.
- Бреслина И.П. Растения и водоплавающие птицы морских островов Кольской Субарктики. Ленинград: Наука. Ленинградское отделение, 1987. 199 с.
- Географические пояса и зональные типы ландшафтов мира: для высших учебных заведений. Учебная карта природных зон. Масштаб 1:15 000000 / Под ред. Е.Н. Лукашёвой. Москва: ГУГК, 1988. 4 л.
- Глазовская М.А. Почвы мира. Москва: Изд-во МГУ, 1972. 229 с.
- Государственная геологическая карта Российской Федерации. Сост. ГУГПП «Янгеология», 2016.
- Елпатьевский П.В., Таргульян В.О. Геохимические парадоксы коралловых островов Тихого океана // Известия Академии наук СССР. Серия географическая. 1985. № 4. С. 35–46.
- Жарикова Е.А. Свойства почв орнитогенных ландшафтов // Региональные проблемы. 2020. Том 23. № 1. С. 17–22. <https://doi.org/10.31433/2618-9593-2020-23-1-17-22>
- Зеленская Л.А. Колонии морских птиц Тауйской губы и п-ова Кони (Охотское море) // Вестник Северо-Восточного научного центра ДВО РАН. 2013. № 3. С. 87–100.
- Иванов А.Н., Авессаломова И.А., Хрусталева М.А. Биогеохимия орнитогенных геосистем Ямских островов (Охотское море) // География и природные ресурсы. 2009. № 4. С. 100–106.
- Иванов А.Н., Булочникова А.С., Полякова Ю.А., Тришин А.Ю. Влияние морских птиц на геосистемы малых островов // Сохранение биоразнообразия Камчатки и прилегающих морей: материалы IX международной научной конференции, посвященной 100-летию с начала Камчатской экспедиции Императорского Русского географического общества, снаряженной на средства Ф.П. Рябушинского (Петропавловск-Камчатский, 25–26 ноября 2008 г.). Петропавловск-Камчатский: Камчатский филиал Тихоокеанского института географии ДВО РАН, 2008. С. 142–145.
- Иванов А.Н., Иванов А.В. О специфике островного почвообразования (на примере островов Северо-Западной Пацифики) // Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение. 2020. № 2. С. 10–16.
- Классификация и диагностика почв России / Авторы и составители: Л.Л. Шишов, В.Д. Тонконогов, И.И. Лебедева, М.И. Герасимова. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
- Плещенко С.В. Некоторые особенности почвообразования в местах массовых поселений морских колониальных птиц на острове Талан // Прибрежные экосистемы Северного Охотоморья: остров Талан. Магадан: ИБПС ДВО РАН, 1992. С. 109–115.

- Полевой определитель почв. Москва: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 2008. 182 с.
- Почвенная карта Магаданской области. Масштаб 1:2500000 / Н.В. Ермакова (ред.). Москва: ГУГК, 1990.
- Почвенная карта РСФСР. Масштаб 1:2500000 / В.М. Фридланд (ред.). Москва: ГУГК, 1988.
- Почвенная карта Северо-Востока Евразии. Масштаб 1:2500000 / Наумов Е.М. (ред.). Москва: ГУГК, 1993.
- Соболев Н.С., Герасимова М.И. Сухоторфяно-литозёмы островных баров Тауйской губы // Почвы и окружающая среда [Электронный ресурс]: Сборник научных трудов Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 55-летию Института почвоведения и агрохимии СО РАН (Новосибирск, 2–6 октября 2023 г.). Новосибирск: ИПА СО РАН, 2023. С. 180–183. <https://doi.org/10.31251/conf1-2023>
- Урусевская И.С., Алябина И.О., Шоба С.А. Карта почвенно-экологического районирования Российской Федерации. Масштаб 1:8000000. Пояснительный текст и легенда к карте / И.С. Урусевская (отв. ред.). Москва: ООО «МАКС Пресс», 2019. 100 с.
- Ушаков М.В. Продолжительность ледового сезона на реках Тауйской губы в условиях климатических изменений // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2022. Том 8. № 2. С. 236–245.
- Физико-географический атлас мира / Под ред. И.П. Герасимова. Москва, 1964. 298 с.
- Хорева М.Г., Зеленская Л.А., Андриянова Е.А. Формирование растительного покрова на островных барах Ольской лагуны (Охотское море) в условиях быстрорастущей численности морских птиц // Сибирский экологический журнал. 2016. Том 23. № 3. С. 299–312. <https://doi.org/10.15372/SEJ20160302>
- Domínguez M.T., Gutiérrez E., González-Domínguez B., Román M., Ávila J.M., Ramo C., Gonzalez J.M., García L.V. Impacts of protected colonial birds on soil microbial communities: When protection leads to degradation // Soil Biology and Biochemistry. 2017. Vol. 105. P. 59–70. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.11.007>
- USGS [Электронный ресурс]. URL: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (дата обращения 07.04.2024).
- Weather Spark [Электронный ресурс]. URL: <https://weatherspark.com/y/144596/Average-Weather-in-Ola-Russia-Year-Round> (дата обращения 18.02.2024).

Поступила в редакцию 05.03.2024

Принята 17.05.2024

Опубликована 06.06.2024

Сведения об авторах:

Соболев Николай Сергеевич – младший научный сотрудник отдела генезиса, географии, классификации и цифровой картографии почв ФГБНУ ФИЦ Почвенный институт имени В.В. Докучаева (г. Москва, Россия); студент кафедры геохимии ландшафтов и географии почв географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова (г. Москва, Россия); kolyhome2000@yandex.ru

Герасимова Мария Иннокентиевна – доктор биологических наук, профессор географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова (г. Москва, Россия); ведущий научный сотрудник отдела генезиса, географии, классификации и цифровой картографии почв ФГБНУ ФИЦ Почвенный институт имени В.В. Докучаева (г. Москва, Россия); maria.i.gerasimova@gmail.com

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.



Статья доступна по лицензии [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Soils of the island bars of the Ola lagoon (Okhotsk sea)

© 2024 N. S. Sobolev ^{1,2}, M. I. Gerasimova ^{1,2}

¹Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, 1, Moscow, Russia. E-mail: kolyhome2000@yandex.ru; maria.i.gerasimova@gmail.com

²Dokuchaev Soil Science Institute, Pyzhevsky lane 7/2, Moscow, Russia.

The aim of the study. The purpose of the work is investigating soil formation on the island bars of the Ola Lagoon, as soil formation there has a special character due to the severe climate, dynamism and small age of the landscapes, and the influence of marine colonial birds.

Location and time of the study. Field studies were conducted in June-July 2022 in the coastal zone of the Ola Lagoon of Magadan Region; laboratory and desk studies were conducted in 2022 and 2023.

Methods. Methods included route observations with soil profile descriptions, mesomorphological studies; soil physical and chemical analyses: pH, electrical conductivity (TDS), loss on ignition (LOI); satellite photos interpretation and soil mapping.

Results. The bar soils were qualified as dry-peat lithozems, differing in the thickness of the dry peat horizon TJ and the abundance of skeletal material (pebble). The dry-peat horizon is gradually merging into parent rock - dense marine pebbles, which are sometimes found in the dry-peat horizon due to storm "surges" from the sea. The TJ horizon consists of mesophilic plant residues and morphons of dark fine-disperse matter and a large number of semi-decomposed and living roots penetrating into the pebble layer. In the WRB system, soils correspond to Histic Leptosols (if shallow), or to Mawic Fibric Histosols.

Conclusion. Formation of the dry-peat lithozems with the TJ-(TJ/C)-C profile is determined by the dry marine climate and low plant diversity of the meadows dominated by reed grass and wild rye. The main factors, shaping soil properties, are the island bars dynamics, specific of pebbles a parent rock material, salt impulverization and marine birds colonies presence. The research expands the knowledge on poorly studied soils of the region, and may contribute to substantiating their position in the classification of soils of Russia; in addition, the data obtained are useful within the framework of sustainable development, as it serves as nesting ground for colonial seabirds.

Keywords: Northern part of the Sea of Okhotsk; dry-peat horizon; oceanic meadows; landscape dynamism; pebble; marine colonial birds.

How to cite: Sobolev N.S., Gerasimova M.I. Soils of the island bars of the Ola lagoon (Okhotsk Sea). The Journal of Soils and Environment. 2024. 7(2). e253 (in Russian with English abstract). DOI: [10.31251/pos.v7i2.253](https://doi.org/10.31251/pos.v7i2.253).

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors express their gratitude to M. G. Khoreva and L. A. Zelenskaya of the Institute of the Biological Problems of the North, the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences (Magadan, Russia), for assistance in field work and provision of drone photos, and to Y. V. Konoplyanikova of the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia) for assistance in mesomorphological analysis.

FUNDING

The work was carried out with the financial support of the Lomonosov Moscow State University as part of the field training of the 3rd year students of the Department of Geochemistry of Landscapes and Geography of Soils, Faculty of Geography, and the research project of the Department No. 1.4 "Anthropogenic geochemical transformation of the landscape components".

REFERENCES

- Abakumov E.V. Zoogenic pedogenesis as the main biogenic soil process in Antarctica. The Russian Journal of Ornithology. 2014. Vol. 23. Express-issue No. 972. P. 576–584. (in Russian).
- Alisov B.P. Climates of the USSR. Moscow: Publishing House MSU, 1956. 128 p. (in Russian).
- Akhromeev L.M. Geomorphologic dictionary-reference book / P.G. Shevchenkova (ed.). Bryansk: Bryansk State University Publ., 2002. 320 p. (in Russian).
- Breslina I.P. Plants and waterfowl of the sea islands of the Kola Subarctic. Leningrad: Nauka Publ. Leningrad department, 1987. 199 p. (in Russian).
- Geographical Belts and Zonal Types of Landscape of the World Scale. Educational Map of Natural Zones. Scale 1:15 000000 / Edited by E.N. Lukashyova. Moscow: GUGK Publ., 1988. 4 sheets. (in Russian).
- Glazovskaya M.A. Soils of the World. Moscow: Publishing House MSU, 1972. 229 p. (in Russian).
- State Geological Map of the Russian Federation. Compiled by. GUGGP "Yangeologiya", 2016. (in Russian).
- Elpatyevsky P.V., Targulian V.O. Geochemical paradoxes of coral islands of the Pacific Ocean. Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Seriya geograficheskaya. 1985. No. 4. P. 35–46. (in Russian).
- Zharikova E.A. Soil properties of ornithogenic landscapes. Regional Problems. 2020. Vol. 23. No. 1. P. 17–22. (in Russian). <https://doi.org/10.31433/2618-9593-2020-23-1-17-22>

- Zelenskaya L.A. Seabird colonies in the Tauysk bay and on the Koni Peninsula (Sea of Okhotsk). Bulletin of the North-East Scientific Center, Russia Academy of Sciences Far East Branch. 2013. No. 3. P. 87–100. (in Russian).
- Ivanov A.N., Avessalomova I.A., Khrustaleva M.A. Biogeochemistry of ornithogenic geosystems of the Yamskiy Islands (Sea of Okhotsk). Geografia i prirodnye resursy. 2009. No. 4. P. 100–106. (in Russian).
- Ivanov A.N., Bulochnikova A.S., Polyakova Y.A., Trishin A.Yu. Influence of sea birds on geosystems of small islands. In book: Conservation of biodiversity of Kamchatka and adjacent seas. Proceedings of the IX international scientific conference devoted to the 100th anniversary of the beginning of the Kamchatka expedition of the Imperial Russian Geographical Society, funded by F.P. Ryabushinsky (Petropavlovsk-Kamchatsky, 25–26 November, 2008). Petropavlovsk-Kamchatsky: Publishing house Kamchatka Branch of the Pacific Institute of Geography FEB RAS. 2008. P. 142–145. (in Russian).
- Ivanov A.N., Ivanov A.V. About the specifics of the island soil formations (on the example of the islands of Northwest Pacific). Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya 17: Pochvovedenie. (Lomonosov Soil Science Journal). 2020. No. 2. P. 10–16. (in Russian).
- Classification and diagnostics of soils of Russian / Authors and compilers: L.L. Shishov, V.D. Tonkonogov, I.I. Lebedeva, M.I. Gerasimova. Smolensk: Oykumena Publ., 2004. 342 p. (in Russian).
- Pleshchenko S.V. Some features of soil formation in places of mass settlements of marine colonial birds on Talan Island. Coastal ecosystems of the Northern Okhotomorye: Talan Island. Magadan: IBPS FEB RAS, 1992. P. 109–115. (in Russian).
- Field guide for Russian soils. Moscow: Dokuchaev Soil Science Institute, 2008. 182 p. (in Russian).
- Soil map of Magadan oblast. Scale 1:2500000 / N.V. Ermakova (ed.). Moscow: GUGK Publ., 1990. (in Russian).
- Soil map of RSFSR. Scale 1: 2500000 / V.M. Fridland (ed.). Moscow: GUGK Publ., 1988. (in Russian).
- Soil map of the North-East of Eurasia. Scale 1:250 000 / E.M. Naumov (ed.). Moscow: GUGK Publ., 1993. (in Russian).
- Sobolev N.S., Gerasimova M.I. Dry-peat lithozems of island bars in the Tauy bay. In book: Soils and Environment [Electronic resource]: Collection of scientific papers of the All-Russian scientific conference with international participation, dedicated to the 55th anniversary of the Institute of Soil Science and Agrochemistry SB RAS (Novosibirsk, October 2–6, 2023). Novosibirsk: SSA SB RAS, 2023. P. 180–183. (in Russian). <https://doi.org/10.31251/conf1-2023>
- Urusevskaya I.S., Alyabina I.O., Shoba S.A. Map of soil-ecological zoning of the Russian Federation. Scale 1:8000000. Explanatory text and legend to the map / I.S. Urusevskaya (ed.). Moscow: LLC “MAKS Press”, 2019. 100 p. (in Russian).
- Ushakov M.V. The duration of the ice season on the rivers of the Tauy estuary in the context of climate change. Geopolitika i ekogeodinamika regionov. 2022. Vol. 8. No. 2. P. 236–245. (in Russian).
- Physico-geographical atlas of the world / I.P. Gerasimov (ed.). Moscow, 1964. 298 p. (in Russian).
- Khoreva M.G., Zelenskaya L.A., Andriyanova E.A. Vegetation development on the barrier islands of the Ola lagoon (the Sea of Okhotsk) in conditions of the rapidly increasing number of seabirds. Contemporary Problems of Ecology. 2016. Vol. 9. No. 3. P. 254–265. <https://doi.org/10.1134/S1995425516030069>
- Domínguez M.T., Gutiérrez E., González-Domínguez B., Román M., Ávila J.M., Ramo C., Gonzalez J.M., García L.V. Impacts of protected colonial birds on soil microbial communities: When protection leads to degradation. Soil Biology and Biochemistry. 2017. Vol. 105. P. 59–70. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.11.007>
- USGS [Electronic resource]. URL: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (accessed on 07.04.2024).
- Weather Spark [Electronic resource]. URL: <https://weatherspark.com/y/144596/Average-Weather-in-Ola-Russia-Year-Round> (accessed on 18.02.2024).

Received 05 March 2024

Accepted 17 May 2024

Published 06 June 2024

About the authors:

Nikolay S. Sobolev – junior researcher of the Department of Genesis, Geography, Classification and Digital Cartography of Soils, Dokuchaev Soil Institute (Moscow, Russia); student of the Department of

Geochemistry of Landscapes and Geography of Soils, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russia); kolyhome2000@yandex.ru.

Maria I. Gerasimova – Doctor of Biological Sciences, Professor, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russia); Leading Researcher, Department of Genesis, Geography, Classification and Digital Soil Cartography, Dokuchaev Soil Institute (Moscow, Russia); maria.i.gerasimova@gmail.com.

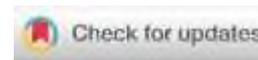
The author(s) read and approved the final manuscript



The article is available under [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

УДК 631.4

<https://doi.org/10.31251/pos.v7i2.255>



Почвы авамской лесотундры (юго-западный Таймыр)

© 2024 И. Д. Махатков ^{1,2}, Б. А. Смоленцев ¹

¹ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, проспект Академика Лаврентьева, 8/2, г. Новосибирск, 630090, Россия. E-mail: makhatkov@issa-siberia.ru; smolentsev.b@issa-siberia.ru

²Научно-исследовательский институт сельского хозяйства и экологии Арктики – филиал ФГБНУ Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр СО РАН», ул. Комсомольская, 1, г. Норильск, 663305, Россия. E-mail: norilskniiks@mail.ru

Цель исследования. Общая характеристика почвенного покрова малоизученной территории авамской тундры.

Место и время проведения. Участок Северо-Сибирской низменности в среднем течении р. Дудытты, 45–60 км севернее Средне-Сибирского плоскогорья, по материалам почвенного обследования во время летнего сезона (конец июля – середина августа) 2021 года.

Методология. Почвенные разрезы (24) были заложены на трёх ключевых участках, в наиболее типичных местообитаниях. В 53 образцах из 13 разрезов определены основные почвенно-химические свойства.

Основные результаты. Почвы постлиторального стола в автоморфных условиях представлены на суглинках криозёмами и подбурами – на песках и супесях. В условиях затруднённого дренажа распространены глееватые подтипы этих почв или торфяно-глеевые почвы. Криозёмы в большей степени характерны для листовенничных редколесий, распространённых в основном в восточной части территории. Подбуры распространены в основном на песчаных камах восточной части и на второй надпойменной террасе Дудытты и Кыстыхтаха. Для пятнистых тундр вторых надпойменных террас характерны микрокомплексы подбуров иллювиально-железистых и иллювиально-гумусовых. На супесчаных и суглинистых отложениях под пятнами формируются подбуры с поверхностным оgleением, занимающие переходное положение к криозёмам поверхностно-глеевым. Поймы заняты серогумусовыми аллювиальными почвами, на пониженных участках первой надпойменной террасы встречаются аллювиальные торфяно-минеральные почвы.

Заключение. В целом на обследованной территории распространены почвы, характерные для лесотундры Таймыра. Широкое распространение подбуров может быть характерной чертой наиболее дренированными частями вторых надпойменных террас. Можно предположить, что в центральных, более гидроморфных частях локальных водоразделов большую роль играют глеезёмы, встреченные нами только в отрицательных формах рельефа.

Ключевые слова: Северо-Сибирская низменность; река Дудытты; почвенный покров.

Цитирование: Махатков И.Д., Смоленцев Б.А. Почвы авамской лесотундры (юго-западный Таймыр) // Почвы и окружающая среда. 2022. Том 7. № 2. e255. DOI: [10.31251/pos.v7i2.255](https://doi.org/10.31251/pos.v7i2.255)

ВВЕДЕНИЕ

Лесотундра Таймыра, особенно в её западной части, испытывает значительное техногенное влияние, связанное в основном с металлургической промышленностью. Природные комплексы этой зоны, в том числе и почвенный покров, изучены крайне неравномерно, что связано с труднодоступностью территории.

С целью оценки оленьих пастбищ в летний сезон (конец июля – середина августа) 2021 года силами сотрудников нескольких институтов проводилось обследование территории с посёлком Усть-Авам в центре. Кроме этого изучались и другие компоненты природной среды, в том числе – почвенный покров. Почвенное обследование было совмещено с работами, направленными прежде всего на ресурсную оценку оленьих пастбищ и охватывало только наиболее типичные ландшафты вблизи мест базирования. Хотя перед нами не стояла задача полноценного обследования почвенного покрова территории, однако собранный материал позволяет охарактеризовать наиболее распространённые почвы территории и может быть полезен в дальнейшем изучении почвенного покрова Таймыра.

Целью настоящей работы была общая характеристика почвенного покрова малоизученной территории авамской тундры.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Район исследований охватывал значительную территорию Северо-Сибирской низменности в среднем течении р. Дудыпты, 45 – 60 км севернее Среднесибирского плоскогорья (рис. 1).

Исследования были сконцентрированы в пределах трёх ключевых участков:

1. «Нерпалах» с центром $93^{\circ}43'09,32''$ в.д., $71^{\circ}03'01,21''$ с.ш.;
2. «Батайка» с центром $92^{\circ}39'19,88''$ в.д., $71^{\circ}13'08,43''$ с.ш.;
3. «Кыстыктах» с центром $91^{\circ}15'10,89''$ в.д., $70^{\circ}56'56,03''$ с.ш.

В геоморфологическом отношении территория относится к пологоволнистой морской аккумулятивной равнине с наложенными холмисто-грядовыми ледниковыми формами. Ключевые участки представлены геоморфологическими поверхностями разного генезиса. Водораздельные поверхности самого западного участка «Кыстыктах», расположенного вблизи устья р. Кыстыктах, левого притока р. Дудыпта, сложены древними террасами преимущественно морского генезиса. Водолаздельные поверхности центрального участка «Батайка», вблизи устья р. Батайка, правого притока р. Дудыпта – преимущественно древними речными террасами. В обоих случаях данные поверхности соответствуют второй надпойменной террасе этих рек (Таймыро-Североземельская область, 1970). Поверхности выположены, с оврагами вблизи склонов к реке и замкнутыми депрессиями. В составе поверхностных отложений западного участка указаны глины ленточные, алевриты, пески. Поверхностные отложения центрального участка более лёгкие – алевриты песчаные и пески с галькой и валунами. Ландшафты центрального и западного участков включают долины крупных рек – Дудыпта и Кыстыктах. Их поймы высотой до 5–6 м над урезом воды хорошо выражены, шириной до 3–3,5 км. Первая надпойменная терраса выражена фрагментарно, и только на 2–4 м выше поймы. Вторая надпойменная терраса отграничена от поймы и первой надпойменной террасы крутым уступом, высотой 10–15, местами до 20 м. Поверхность самого восточного участка, «Нерпалах», находится в пределах камовых ландшафтов (Сакс, 1945). Камы с относительными высотами около 20–30 м и склонами от 5 до 10° , местами до 15° сложены песками, гравием и галькой. Здесь же могут встречаться моренные суглинки. Кроме того, участок охватывает плоские озёрно-ледниковые равнины, сложенные супесями, алевритами и глинами. Долина реки Нерпалах узкая, шириной не более 80 м. От озёрно-ледниковой террасы речная долина отграничена уступом 8–10 м.

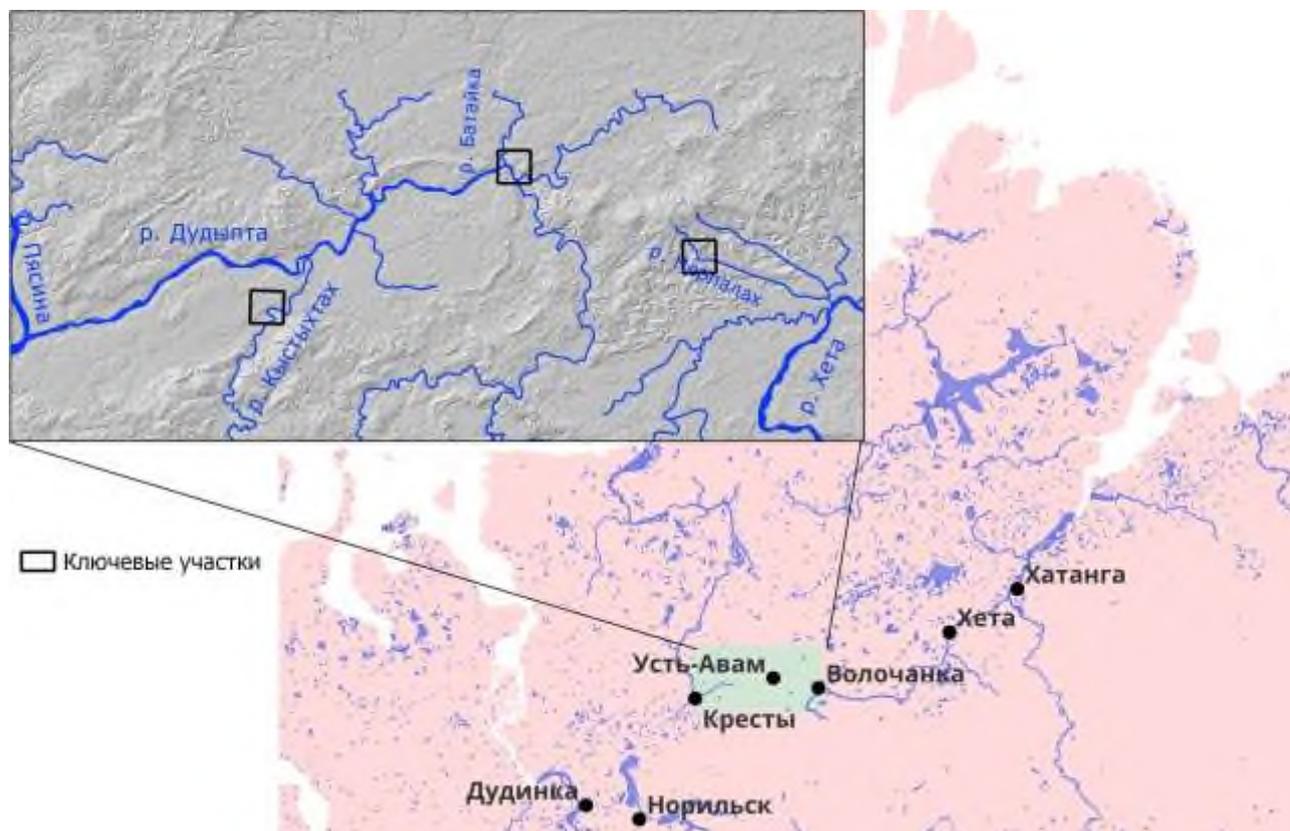


Рисунок 1. Схема полевых работ.

Климат территории континентальный субарктический (Хромов, Петросянц, 2006). По данным двух метеостанций в поселках Кресты и Волочанка за период с 01.01.1971 по 31.12.2016, средние температуры меняются с запада на восток от 12,2 до 12,9 °С в июле, от -28,8 до -30,8 °С в январе, при почти одинаковой среднегодовой температуре – -11,4 и -11,3 °С, соответственно. Годовые осадки увеличиваются с запада на восток от 303 до 339 мм (Погода и климат <http://www.pogodaiklimat.ru/archive.php>, дата обращения 22.02.2024), как и сумма биологически активных температур выше +5 °С – 826 и 896 °С×сут, соответственно. Максимальная мощность снежного покрова (апрель) увеличивается с запада на восток, от 51,7 до 71,2 см. Оттаивание деятельного слоя почвы начинается в мае (Таймыро-Североземельская область, 1970). В целом, континентальность климата нарастает с запада на восток вместе с ростом количества осадков.

Растительность территории относится к Южному району Округа южнотаймырских низменностей, для которого характерны кустарниковые тундры и лиственничные редколесья (Таймыро-Североземельская область, 1970). Для южных тундр Таймыра характерно развитие кустарникового яруса из *Duschekia fruticosa*, *Betula nana* и некоторых кустарниковых ив (*Salix lanata*, *S. glauca*, *S. phylicifolia*, *S. pulchra* и др.). Лиственничные редколесья характерны для восточной части территории; в западной низкорослые деревья лиственницы единичны, лиственница нередко принимает стланиковую форму. Распространение лиственницы связывают с высокими летними температурами и сухостью воздуха (Раковская, Давыдова, 2001). На обширных пространствах вторых надпойменных террас крупных рек – Дудыпта и Кыстыхта, распространены пятнистые тундры с комплексной растительностью пятен выливания и основной поверхности. Этот комплекс не всегда явно выражен, пятна имеют неясные границы, валики вокруг пятна отчётливо не выделяются, вероятно, вследствие того, что тундровые сообщества здесь находятся на самом южном пределе своего распространения, где криогенные процессы не всегда ясно выражены.

В соответствии с почвенно-географическим районированием (Афанасьева и др., 1979) район находится на стыке двух провинций: Северо-Сибирской провинции тундровых глеевых и тундровых слабоглеевых иллювиально-малогумусовых мерзлотных почв Евразийской полярной области и Северо-Ленской провинции глеево-мерзлотно-таёжных и мерзлотно-болотных почв. Ю.И. Ершов (1998) относит почвы района к мерзлотной формации и по его же районированию (Ершов и др., 2001) – к зоне тундровых глеевых почв и их комплексов, подбуров и криоземов субарктической тундры и лесотундры. Сходные преобладающие почвы указываются и в районировании циркумполярной области – торфяно-глеевые, криозёмы и торфяные почвы субарктической тундры (Соколов, Конюшков, 1998). В Национальном атласе почв Российской Федерации (Национальный атлас ..., 2011) для всей территории наших работ указано преобладание глинистых и тяжелосуглинистых поверхностных отложений. В качестве преобладающих отмечены торфяные болотные переходные почвы, которые соседствуют с ареалами глеезёмов тундровых, почв пятен, а в восточной части – таёжных глеевых. В соответствии с Картой почвенно-экологического районирования (2013), территория исследования охватывает две провинции: в западной части это Средне-Сибирская тундровая провинция тундровых глеевых и арктотундровых слабооглееных гумусных почв, а в восточной – Северо-Ленская провинция глеезёмов торфянисто-перегнойных таёжных и перегнойно-карбонатных почв. В Атласе почв северного циркумполярного региона (Soil Atlas ..., 2010) для вторых надпойменных террас крупной обследованной территории указаны торфяные олиготрофные мерзлотные почвы (Cryic Fibric Histosols) и торфяные аллювиальные (Histic Fluvisol) – для пойм. В восточной части территории отмечаются криозёмы перегнойные (Umbric Cryosols) и криотурбированные (Turbic Cryosols). Кроме того, вблизи ключевых участков находятся обширные ареалы криозёмов типичных (Haplic Cryosols).

В силу сплошного распространения многолетней мерзлоты на территории, за исключением пойм, ведущие факторы ее почвенного генезиса – криогенные процессы и слабое сезонное оттаивание, застойное увлажнение всего почвенного профиля или его нижней части из-за мерзлотного водоупора, интенсивное физическое и замедленное химическое выветривание (Таргульян, 1971; Игнатенко, 1980). Это обуславливает контраст почвенных процессов на силикатных обломочных и глинисто-суглинистых породах. На первых – сравнительно хороший внутренний дренаж, нисходящие потоки растворов, преобладание окислительных процессов и неоглеенность профиля. На вторых – застойный водный режим, боковой вынос веществ, преобладание восстановительных процессов и оглеенность профиля. С криогенными процессами связана микрокомплексность, характерная для почвенного покрова южной тундры. В пятнистых,

мелкобугорковатых и полигонально-трещиноватых тундрах происходит фрагментация органогенных и гумусовых горизонтов (Федоров и др., 2013).

Разрез закладывался до почвообразующей породы, или до многолетнемёрзлого слоя, или до тех пор, пока стенки разреза не начинали оплывать. В случае микрокомплексности почвенного покрова разрез закладывался так, чтобы передняя стенка пересекала элементы комплекса, которые описывались отдельно. Всего было заложено 24 разреза (табл. 1). Индексация генетических горизонтов и диагностика почв проводилась согласно Классификации и диагностики почв России (2004). Морфологические описания разрезов приведены в приложении.

Таблица 1

Почвенные разрезы

№ разреза	Географические координаты		Почва*
	восточная долгота	северная широта	
Участок «Нерпалах»			
1	93°42'33,82"	71°03'29,99"	Глезём иллювиально-ожелезнённый
2	93°42'40,76"	71°03'31,26"	Аллювиальная серогумусовая глееватая
3	93°42'22,90"	71°03'04,43"	Глезём иллювиально-ожелезнённый
4	93°42'20,60"	71°03'02,90"	Подбур иллювиально-железистый оподзоленный
5	93°43'11,03"	71°02'50,21"	Криозём типичный
6	93°43'26,50"	71°02'47,50"	Криозём палево-метаморфизованный
7	93°43'13,10"	71°02'48,60"	Криозём типичный
8	93°43'21,50"	71°03'21,80"	Криозём типичный
9	93°42'53,38"	71°03'39,32"	Подбур иллювиально-железистый
10	93°42'52,70"	71°03'38,00"	Подбур иллювиально- гумусовый глееватый
Участок «Барайка»			
11	93°42'52,70"	71°03'38,00"	Криозём типичный
12	92°39'37,60"	71°13'14,50"	Подбур иллювиально-гумусовый глееватый
13	92°39'25,50"	71°13'25,00"	Подбур иллювиально-железистый глееватый (пятно)
			Подбур иллювиально-гумусовый турбированный (валик)
14	92°39'02,90"	71°13'13,20"	Подбур иллювиально-гумусовый поверхностно-глеевый (понижение)
			Подбур иллювиально-гумусовый (кочка)
15	92°39'14,26"	71°12'55,54"	Аллювиальная торфяно-глеевая
16	92°39'16,23"	71°12'55,26"	Аллювиальная серогумусовая глееватая
17	92°40'18,60"	71°13'01,70"	Подбур иллювиально-железистый (пятно)
			Подбур иллювиально-железистый (валик)
18	92°40'41,80"	71°12'58,30"	Подбур иллювиально- железистый поверхностно-глеевый (пятно)
			Подбур иллювиально-гумусовый (валик)
19	92°40'01,70"	71°13'01,60"	Криозём типичный поверхностно-глеевый
Участок «Кыстыхта»			
20	91°14'53,60"	70°56'43,90"	Криозём глееватый
21	91°14'55,60"	70°56'42,10"	Подбур иллювиально-железистый (пятно)
			Подбур иллювиально-гумусовый (валик)
22	91°15'34,00"	70°56'51,00"	Торфяно-криозём
23	91°15'04,10"	70°56'48,50"	Криозём глееватый
24	91°15'04,00"	70°56'41,60"	Аллювиальная серогумусовая

Примечание.

* – название почв приведено согласно «Классификация и диагностика почв России» (2004).

В 53 почвенных образцах, отобранных однократно, из 13 разрезов в ИПА СО РАН были определены основные характеристики: pH солевой (pH_{KCl}) по методу ЦИНАО (ГОСТ 26483-85); гидролитическая кислотность (Нr) по методу Каппена в модификации ЦИНАО (ГОСТ 26212-91); органическое вещество (ОВ) фотометрическим и гравиметрическим методом (ГОСТ 26213-2021, ГОСТ 27784-88); физическая глина пипеточным методом (ГОСТ 12536-2014); железо общее, двух- и трёхвалентное по Веригиной-Аринушкиной (ГОСТ 27395-87); обменные кальций (Ca²⁺) и магний (Mg²⁺) атомно-абсорбционным методом (ГОСТ 26487-85, п. 1). В качестве аналитического критерия окисленности почв использовали коэффициент окисленности: $K_o = Fe^{3+}/\sum Fe$. При величине K_o равной 0,9–1,0 окисленность считается очень высокая; 0,9–0,8 – высокая; 0,8–0,7 – средняя; 0,7–0,6 – низкая; <0,6 – очень низкая (Водяницкий, 2017).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Ствол: Постлигтогенные почвы

На всех обследованных участках почвообразующие породы оказались большей частью лёгкого гранулометрического состава, от рыхлых песков до средних суглинков (табл. 2). Кроме камовых сооружений восточной части территории, песчаные и супесчаные отложения преобладают и на второй надпойменной террасе Дудыпты и, в меньшей степени, Кыстыхтаха. Для почвообразующих пород восточной части территории характерно присутствие окатанной гальки, около 1%.

Отдел: Криотурбированные почвы

Тип: Криозёмы

На суглинистых отложениях ведущими факторами почвообразования выступают криогенный и глеевый процесс. В автоморфных позициях формируются криозёмы, которые в Средней Сибири характерны для лиственничных лесов и редколесий и рассматриваются в качестве зональных (Иванова, Десяткин, 2011), и криозёмы глееватые – в более гидроморфных условиях. Криозёмы в большей степени характерны для восточной части территории, что может быть связано с нарастанием континентальности климата в этом направлении (Богатырев и др., 1971). В целом, криозёмы обследованной территории по строению профиля и химизму сходны с описанными для прилегающих районов (Иванова, Десяткин, 2011; Ершов, 2022).

На склонах к долине р. Нерпалах и пологоволнистых поверхностях, под лиственничными редколесьями и фрагментами редкостойных лесов встречаются криозёмы типичные (см. Приложение, разрезы 5, 7, 8, 11) и палево-метаморфизированные (разрез 6). Во всех разрезах криозёмов сухая мерзлота вскрывалась не выше 70 см. В нижней части органогенного горизонта, как правило, выделяется более тёмная, оторфованная часть (разрез 5, 6, 11). В наиболее дренированных условиях (разрез 6) органогенный горизонт легко отделяется от ниже лежащего минерального горизонта. Под лиственничными редколесьями на поверхности встречаются небольшие, диаметром около 0,5 м, пятна выливания, под которыми в профиле криозёмов типичных полностью отсутствует органогенный горизонт (разрез 7). Минеральная часть криозёмов типичных и палево-метаморфизированных слабо дифференцирована в силу невысокой активности процессов почвообразования и гомогенизации под влиянием криотурбирования (Десяткин и др., 2021). В верхней части криозёмов палево-метаморфизированных выделяется криотурбированный горизонт с признаками палевого метаморфизма (CRpI), однородно светло-серый с тёмными затёками гумуса в верхней части (разрез 6). Неясные осветлённые пятна встречались и в верхней части криогенного горизонта криозёмов типичных (разрезы 8, 11). Почти всегда криогенный горизонт в верхней части имел коричневатые оттенки, а в нижней – охристые, что позволяло выделять его гумусированную и ожелезнённую части. Явные признаки криотурбаций проявлялись в виде включений грубой органики до глубины более 30 см (разрез 5, 8). В надмерзлотном слое встречаются тёмно-серые пятна (разрез 8), возможно, вследствие ретинизации гумуса (Мергелов, Таргульян, 2011; Губин, Лупачев, 2018).

Криозёмы характеризуются сильнокислой реакцией органо-аккумулятивных горизонтов и слабокислой и кислой – минеральных (см. табл. 2, разрез 6, 8). Гидролитическая кислотность резко падает в минеральной толще, что отмечается и для криозёмов Якутии (Иванова, Десяткин, 2011) – «мерзлотная таёжная неоглееная» (Десяткин и др., 2022). Несмотря на признаки криотурбирования, распределение органического вещества в минеральной части криозёмов аккумулятивного типа; его содержание снижается с глубиной и, в целом, меньше приводимого для большинства суглинистых мерзлотных почв (Мергелов, Таргульян, 2011), в том числе для лесотундры Таймыра (Сеньков, 2014).

Таблица 2

Свойства почв

№	Горизонт	Глубина, см	pH _{KCl}	Hr	Ca ²⁺	Mg ²⁺	V, %	Физ. глина, %	Fe ²⁺	Fe ³⁺	Ко	ОВ, %
				ммоль/100 г					%			
Глеезём иллювиально-ожелезнённый. Заболоченная кустарниковая моховая тундра												
1	O	0–3	5,25±0,1*									93,34±5,60
	T	3–10	6,27±0,1									75,07±2,25
	Gf	10–14	5,87±0,1	1,6±0,19	7,28±0,55	3,46±0,26	87	17,2±3,44	0,071±0,011	1,720±0,260	0,96	1,63±0,33
	G	14–25	5,25±0,1	2,16±0,26	8,73±0,66	4,69±0,35	86	21,5±4,30	0,263±0,039	0,910±0,140	0,78	1,33±0,27
Аллювиальная серогумусовая глееватая. Пойменные ивняки осоковые												
2	AУ	0–33	4,30±0,1	3,40±0,41	9,50±0,70	2,06±0,15	77	15,6±3,12	0,038±0,006	1,330±0,200	0,97	1,30±0,25
	C~g	33–55	4,20±0,1	4,71±0,57	10,50±0,80	1,92±0,19	73	21,5±4,30	0,323±0,048	1,550±0,230	0,83	1,80±0,36
Криозём палево-метаморфизированный. Лиственничное ерниково-багульниковое мохово-лишайниковое редколесье												
6	O	0–4	3,40±0,1	72,1±8,7								90,10±0,60
	OT	4–5	3,80±0,1	33,5±4,00								26,30±0,75
	CRpl	5–20	5,30±0,1	1,46±0,18	15,7±1,20	3,11±0,23	93	22,2±4,44	0,020±0,003	0,430±0,065	0,96	0,98±0,20
	CR	20–50	5,50±0,1	1,23±0,15	14,7±1,10	2,82±0,21	93	17,5±3,50	0,018±0,003	0,368±0,055	0,95	0,67±0,13
	C	50–70	5,90±0,1	0,95±0,11	15,2±1,10	2,74±0,21	95	22,0±4,40	0,010±0,001	0,475±0,071	0,98	0,52±0,10
Криозём типичный. Ерник хвощёво-зеленомошный												
8	O	0–2	3,39±0,1									87,85±2,64
	CRhi	2–9	4,23±0,1	5,48±0,66	6,48±0,49	2,57±0,19	62	24,5±4,90	0,044±0,007	0,430±0,065	0,91	2,23±0,45
	CRf	9–30	4,24±0,1	4,92±0,59	7,50±0,56	3,01±0,23	68	26,9±5,38	0,031±0,005	0,500±0,075	0,94	2,13±0,43
	CR	30–72	4,62±0,1	2,52±0,3	5,75±0,43	2,34±0,18	76	15,6±3,12	0,018±0,003	0,328±0,049	0,95	1,13±0,23
Подбур иллювиально-железистый глееватый. Кустарничково-лишайниковая тундра												
10	BH	0–4	3,90±0,1	11,2±1,3	3,10±0,30	0,48±0,05	24	9,2±1,84	0,139±0,021	0,229±0,034	0,62	5,20±0,52
	BHg	4–12	4,40±0,1	3,82±0,46	0,60±0,10	0,16±0,03	17	3,6±0,72	0,078±0,012	0,123±0,018	0,61	1,10±0,22
	BCg	12–35	4,70±0,1	2,41±0,29	1,60±0,10	0,30±0,03	44	3,6±0,72	0,029±0,004	0,101±0,015	0,78	0,43±0,09
	Cg	35–50	4,90±0,1	1,70±0,20	3,00±0,30	0,48±0,05	67	3,8±0,76	0,018±0,003	0,078±0,012	0,81	0,64±0,13
Подбур иллювиально-железистый турбированный. Пятнистая тундра												
13	BF	0–32	4,22±0,1	3,82±0,46	1,46±0,13	0,79±0,08	37	6,1±1,22	0,023±0,004	0,271±0,041	0,92	1,21±0,24
	BCg	32–70	4,81±0,1	1,03±0,12	3,20±0,29	1,68±0,17	83	6,4±1,28	0,008±0,001	0,181±0,027	0,96	0,27±0,05

№	Гори- зонт	Глубина, см	pH _{KCl}	Hr	Ca ²⁺	Mg ²⁺	V, %	Физ. глина, %	Fe ²⁺	Fe ³⁺	Ko	OB, %
				ммоль/100 г				%				
	Cg	70–110	4,97±0,1	0,99±0,12	3,71±0,33	2,02±0,15	85	7,5±1,50	0,006±0,001	0,197±0,030	0,97	0,17±0,03
Аллювиальная торфяно-глеявая. Ивняк злаково-осоковый зеленомошный												
15	T	0–15	4,59±0,1	5,98±0,72	9,46±0,71	4,69±0,35	70	22,2±4,44	0,031±0,005	1,530±0,230	0,98	8,74±0,87
	G	15–30	4,58±0,1	3,26±0,39	5,97±0,45	2,62±0,20	72	16,6±3,32	0,026±0,004	0,790±0,120	0,97	1,94±0,39
	Cg~⊥	30–35	4,89±0,1	2,62±0,31	7,28±0,55	3,58±0,27	81	22,2±4,44	0,037±0,006	1,220±0,180	0,97	1,75±0,35
Аллювиальная серогумусовая. Ивковая зл-осок моховая тундра												
16	O	0–5	4,80±0,1	5,48±0,66	17,30±1,3	3,11±0,23	79	21,3±4,26	0,099±0,015	0,960±0,140	0,91	5,10±0,51
	AUh	5–20	4,40±0,1	5,03±0,60	15,20±1,1	2,74±0,21	78	22,5±4,50	0,061±0,010	0,910±0,140	0,94	2,20±0,45
	C~fg	20–44	4,20±0,1	2,46±0,30	7,20±0,50	1,29±0,13	78	8,6±1,72	0,017±0,003	0,652±0,098	0,97	1,00±0,21
	C~g	44–61	4,50±0,1	3,05±0,37	11,60±0,90	2,28±0,17	82	15,1±3,02	0,034±0,005	0,970±0,150	0,97	0,93±0,19
	C~g⊥	61–65	4,80±0,1	2,92±0,35	13,90±1,00	2,87±0,22	85	17,1±3,42	0,054±0,008	1,120±0,170	0,95	1,40±0,28
Подбур иллювиально-железистый глееватый. Куст-лш тундра (основная поверхность)												
17	BH	0,5–22	3,93±0,1	7,76±0,93	0,87±0,15	0,35±0,04	14	8,3±1,66	0,052±0,008	0,266±0,040	0,84	3,00±0,45
	BF	22–32	4,35±0,1	3,56±0,43	19,70±1,50	0,96±0,10	85	5,9±1,18	0,057±0,009	0,166±0,025	0,75	0,55±0,11
	BC	32–73	4,26±0,1	1,34±0,16	19,70±1,50	0,91±0,09	94	4,3±0,86	0,003±0,001	0,182±0,027	0,99	0,16±0,03
	Cg	73–106	4,82±0,1	1,15±0,14	4,22±0,38	2,25±0,17	85	8,6±1,72	0,008±0,001	0,225±0,034	0,96	0,21±0,04
	C⊥	106–110	5,08±0,1	0,97±0,12	6,84±0,49	3,36±0,25	91	12,5±2,50	0,006±0,001	0,239±0,036	0,98	0,15±0,03
Подбур иллювиально- железистый поверхностно-глеявый. Пятнистая тундра (пятно)												
18	BF1	4–8	5,13±0,1	1,67±0,20	11,65±0,87	5,31±0,40	91	25,3±5,06	0,031±0,005	0,502±0,075	0,94	0,72±0,14
	G	8–16	4,41±0,1	2,86±0,34	10,55±0,79	5,23±0,39	85	26,9±5,38	0,290±0,044	0,880±0,130	0,75	0,75±0,15
	BF2	16–30	4,78±0,1	2,35±0,28	8,73±0,66	4,79±0,36	85	22,2±4,44	0,053±0,008	0,608±0,091	0,92	0,87±0,17
	BCg	30–50	5,51±0,1	1,10±0,13	11,14±0,84	5,23±0,39	94	24,6±4,92	0,034±0,005	0,510±0,077	0,94	0,45±0,09
Подбур иллювиально-гумусовый. Валик.												
18	BHfg	6–20	4,98±0,1	5,85±0,70	12,88±0,97	4,94±0,37	75	23,3±4,66	0,078±0,012	0,639±0,096	0,89	7,40±0,74
	BF	20–35	5,27±0,1	1,56±0,19	10,55±0,79	4,86±0,36	91	21,2±4,24	0,036±0,005	0,534±0,080	0,94	0,76±0,15
Торфяно-криозём типичный. Полигональное болото (бугор)												
22	O	0–7	3,72±0,1					15,0±3,00				16,93±0,51
	T1	7–12	4,04±0,1	7,76±0,93	2,98±0,27	1,04±0,10	34	10,4±2,08	0,112±0,017	1,600±0,240	0,93	5,02±0,50
	C	12–28	4,21±0,1									78,31±2,35

№	Гори- зонт	Глубина, см	pH _{KCl}	Hr	Ca ²⁺	Mg ²⁺	V, %	Физ. глина, %	Fe ²⁺	Fe ³⁺	Ko	ОВ, %
				ммоль/100 г					%			
	T2	28–32	4,16±0,1									94,00±5,64
Криозём глееватый. Кочкарная тундра												
23	O	0–6	3,60±0,1	60,2±7,20								66,30±1,99
	CRhg	9–16	4,60±0,1	12,00±1,4	39,90±3,00	6,90±0,52	80	31,2±6,24	0,196±0,029	0,488±0,073	0,71	12,40±1,20
	CRg	16–26	4,70±0,1	4,32±0,52	32,10±2,40	7,12±0,53	90	32,4±6,48	0,173±0,026	0,840±0,130	0,83	1,90±0,39
	Cg	26–47	5,40±0,1	2,86±0,34	36,00±2,70	7,67±0,58	94	33,5±6,70	0,164±0,025	0,610±0,091	0,79	2,40±0,47
	Cg ^L	47–50	5,60±0,1	2,16±0,26	37,40±2,80	7,45±0,56	95	34,2±6,84	0,149±0,022	0,520±0,078	0,78	1,90±0,37
Аллювиальная серогумусовая. Ольховник												
24	A _Y hi	0,5–16	5,20±0,1	3,63±0,44	36,00±2,70	5,37±0,40	92	30,7±6,14	0,151±0,023	1,240±0,190	0,89	3,70±0,56
	C1~	16–46	6,00±0,1	0,85±0,10	10,80±0,80	1,84±0,18	94	8,4±1,68	0,060±0,009	0,910±0,140	0,94	0,52±0,10
	C3~	50–70	6,60±0,1	0,44±0,05	3,40±0,30	0,65±0,07	90	3,0±0,60	0,034±0,005	0,780±0,120	0,96	0,44±0,09

Примечание.

Рассмотрены такие свойства почв как pH солевой (pH_{KCl}); гидролитическая кислотность (Hr); содержание кальция (Ca²⁺) и магния (Mg²⁺) в обменной форме; насыщенность основаниями (V); физическая глина; двух- и трёхвалентное железо (Fe²⁺ и Fe³⁺); коэффициент окисленности (Ko) и органическое вещество (ОВ). Пустые ячейки означают, что данные отсутствуют. * – представлены среднее арифметическое значение ± коэффициент вариации.

При этом криозём типичный отличается большей гидролитической кислотностью и содержанием органического вещества и меньшей насыщенностью основаниями по сравнению с криозёмом палео-метаморфизованным.

На двухчленных отложениях второй надпойменной террасы р. Дудыпта под осочковыми (*Carex arctisibirica*) мохово-лишайниковыми тундрами встречаются криозёмы типичные поверхностно-глеевые (разрез 19). Пятнистость растительного покрова и микрокомплексность почвенного не выражена. В отличие от других криозёмов, верхний суглинистый криотурбированный гумусированный горизонт CR_{hi} довольно резко сменяется криотурбированным горизонтом (CR_g) с ясными признаками оглеения.

На выровненных пространствах второй надпойменной террасы западной части территории (участок «Кыстыхта»), под кочкарными и пятнистыми тундрами, на суглинистых отложениях встречены криозёмы глееватые (разрез 20, 23). Лыдистая мерзлота в этих почвах вскрывалась на глубине 20–60 см. При этом под кочками мёрзлый слой на 6–15 см ниже, чем под мочажинами. Такая закономерность отмечается и для криозёмов с надмерзлотным оглеением в Якутии (Губин, Лупачев, 2008). Органогенный горизонт в нижней части оторфован. Под органогенным горизонтом выделяется маломощный, более выраженный под мочажинами, сильно гумифицированный тёмно-коричневый криотурбированный слой с растительными остатками. Нижележащие горизонты менее гумифицированы. Благодаря близкому мерзлотному водоупору, для всей минеральной части почв характерны признаки оглеения в виде сизоватого оттенка и сизых пятен и криогенное ожелезнение в виде ржавых и охристых разводов. Вся минеральная суглинистая часть бесструктурная или неясно-плитчатая.

Минеральная толща криозёмов глееватых сильно гумифицирована, особенно в верхней части профиля (см. табл. 2, разрез 23); с этим связана и высокая гидролитическая кислотность. Весь профиль отличается высокой насыщенностью основаниями благодаря большому содержанию обменного кальция, что, вероятно, связано с особенностями почвообразующей породы. Коэффициент окисленности по всему профилю снижен, что свидетельствует об анаэробном режиме этих почв.

Отдел: Альфегумусовые почвы

Тип: Подбуры

Кроме камов восточной части территории, лёгкие песчаные и супесчаные отложения широко распространены на краевых частях вторых надпойменных террас крупных рек – Кыстыхта и, особенно, Дудыпты. На этих отложениях, с хорошим внутренним дренажом, ведущим фактором почвообразования выступает альфегумусовый процесс. Почвы представлены подбурами с характерным альфегумусовым коричневым или охристым горизонтом.

На пологих, хорошо дренируемых песчаных отложениях камов, с уклоном около 3–7°, под сомкнутым покровом шикшево-ивняково-арктофиловой цетрариевой тундры, распространены подбуры иллювиально-железистые оподзоленные с характерным для них профилем (разрез 4), с признаками оподзоливания в верхней его части.

На поверхности крутых склонов с уклоном 10–15° и вершинах песчаных камов (участок «Нерпалах») растительный покров не сформирован. Встречаются только редкие подушки *Thymus reverdattoanus*, *Saxifraga spinulosa* и разрозненные экземпляры *Festuca auriculata*, *Equisetum arvense* и других трав. Весь склон покрыт маломощным (4–5 см) галечным чехлом, образовавшимся в результате выноса песка из галечно-песчаных отложений, и препятствующим в настоящее время какому-либо перемещению нижележащего материала. Профиль практически лишён гумуса, а ожелезнение верхней его части слабо выражено (разрез 9). В целом, такие поверхности слабо затронуты почвообразованием, но отсутствие подстилочно-торфяного горизонта не позволяет отнести эти почвы к отделу слаборазвитых псаммозёмов. Исходя из условий хорошего внутреннего дренажа и явного преобладания иллювиально-железистого процесса, мы отнесли эти почвы к подбурам.

На песчаных отложениях со слабонаклонной поверхностью около 1°, под кустарничково-лишайниковыми тундрами формируются подбуры иллювиально-гумусовые глееватые (разрез 10, 12). Гидроморфность профиля выражается в охристых оттенках верхних горизонтов и охристыми, сизоватыми пятнами и ржавыми разводами - в нижних. Органо-аккумулятивный горизонт не выражен или имеет небольшую мощность. Верхний иллювиально-гумусовый тёмно-бурый или коричневатый иллювиально-гумусовый горизонт (ВН) с глубиной меняется на охристо-бурый иллювиально-железистый (BF_g), далее – на охристо-серый переходный к почвообразующей породе (BC_g) (разрез 10) или промежуточный горизонт не выделяется (разрез 12).

Обширные пространства вторых надпойменных террас рек Дудыпта и Кыстыхта заняты сообществами пятнистых тундр с устойчивыми почвенными микрокомбинациями. Их общая черта – более мощный органогенный горизонт и лучшая гумифицированность верхнего минерального горизонта под сомкнутым напочвенным покровом за пределами пятен выливания. Здесь на песчаных отложениях формируются микрокомбинации подбуров иллювиально-железистых под пятнами и иллювиально-гумусовых на основной поверхности и под валиками (разрезы 13, 17, 21). Почва пятна полностью лишена подстилки, на зарастающих пятнах только корка талломов накипных лишайников. Верхний иллювиально-железистый горизонт Vf мощностью 30–35 см, светлых охристых оттенков, без признаков оглеения. Верхние 2–4 см несколько темнее, с кремовым оттенком, что связано с поступлением небольшого количества гумуса. Ниже этот горизонт сменяется таким же песком мощностью 30–40 см, с признаками оглеения – ржавыми разводами и иногда – с сизоватыми пятнами. Оржавленные пятна часто повторяют слоистость отложений, которая в той или иной степени наблюдается и ниже, в материнской породе. За пределами пятна выливания под сплошным напочвенным покровом хорошо выражен органогенный горизонт мощностью 0,5–4 см. Под ним в минеральной части выделяется иллювиально-гумусовый горизонт (Bh) мощностью 15–20 см, светлеющий книзу и затёками переходящий к иллювиально-железистому горизонту (Bf), который под пятнами начинается сразу с поверхности; сухая мерзлота в этих почвах вскрывалась не выше 1 м.

Микрокомбинации встречаются на песчаных отложениях в условиях близкого залегания многолетней мерзлоты, под кочкарными (*Eriophorum vaginatum*) тундрами, при большей гумификации минеральной части профиля (разрез 14). Строение минеральной части профиля под кочкой и пятном в целом сходное – верхний тёмно-серый иллювиально-гумусовый горизонт Bh переходит в иллювиально-железистый горизонт (Bfg) с признаками оглеения в виде сизоватых пятен и ржавых разводов, и далее – в мёрзлую почвообразующую породу. Под пятном между иллювиально-гумусовым и иллювиально-железистым горизонтом сформирована глеевая линза сизовато-серого песка мощностью около 15 см со ржавой каймой и ржавыми разводами в нижней части.

На менее распространённых супесчаных и суглинистых отложениях, под пятнистыми тундрами, подбуры иллювиально-гумусовые образуют микрокомбинации с подбурами иллювиально-железистыми поверхностно-глеевыми (разрез 18). На основной поверхности, под подстилкой сформирован хорошо выраженный коричневатый иллювиально-гумусовый горизонт Bhfg мощностью больше 10 см, который ещё ниже сменяется более светлым охристым Vf. Под пятном верхний иллювиально-железистый горизонт Vf быстро сменяется сизым глеевым горизонтом (G) со ржавой каймой по верхней границе, мощностью до 10 см в центре пятна. К периферии пятна он истончается, вклиниваясь в иллювиально-гумусовый горизонт основной поверхности, а затем полностью исчезает. Сходное формирование глеевой линзы под пятном описано для «почв пятен, тундровой глеевой перегнойной почвы» на суглинке в результате окисления верхнего горизонта (Василевская, 1980, с. 78). Вместе с тем, для пятнистых тундр стационара Агапа приводится обратное сочетание почв микрокомбинаций пятнистых тундр на супесях и суглинках: здесь поверхностное оглеение отмечено на поверхности за пределами пятна (Игнатенко, 1971).

Морфологически микрокомплекс разреза 18 близок к почве разреза 19, которую мы диагностировали как криозём типичный поверхностно-глеевый, т.е. отнесли эти почвы к разным стволам. В обоих случаях наблюдается иллювиирование гумуса, но в условиях легкосуглинистых отложений разреза 18 этот процесс, особенно под валиком, проявляется отчётливее.

Классификацией и диагностикой почв России (2004) не предусмотрены подбуры с поверхностным оглеением, в связи с чем наша диагностика почвы под пятнами разрезов 14 и 18 неочевидна. О преобладании альфегумусового процесса в этих почвах говорит наличие над и под глеевой линзой альфегумусовых горизонтов с насыщенными охристыми тонами. Признаки оглеения, кроме верхней, хорошо отграниченной глеевой линзы, наблюдаются только в надмерзлотных горизонтах в виде отдельных неясных сизоватых пятен. В обоих случаях эти почвы составляют микрокомплекс с почвами без признаков оглеения в верхней части. Исходя из генетической общности почв этих комплексов, почвы пятен также были отнесены к подбурам.

Подбуры сильнокислые в верхней и среднекислые в нижней части профиля. Гидролитическая кислотность резко убывает в нижних горизонтах вместе с содержанием органического вещества и увеличением насыщенности основаниями, что отмечается и для подбуров других территорий (Лазарева, 2012). Наибольшая гидролитическая кислотность и содержание органического вещества свойственна верхним горизонтам подбуров иллювиально-гумусовых (разрез 10, 18 – валик). Эта верхняя часть профиля отличается наименьшей насыщенностью основаниями. Высокой

насыщенностью основаниями отличается подбур на лёгком суглинке (разрез 18). Сравнительно слабая насыщенность основаниями наблюдается только в верхнем, сильно гумифицированном горизонте под валиком с высокой гидролитической кислотностью. Несмотря на яркие охристые оттенки, в иллювиально-железистых горизонтах не наблюдается сильного ожелезнения. Исключение составляет только глеевая линза поверхностно-глеевого подзола под пятнами. При этом соотношение форм железа большей частью хорошо диагностирует анаэробные условия глеевых и глееватых горизонтов.

Отдел: Глеевые почвы

Тип: Глеезёмы

Глеезёмы на обследованной территории были отмечены только в локальных ложбинах второй надпойменной террасы и пониженных частях первой надпойменной террасе р. Нерпалах, на песчаных и супесчаных отложениях, под заболоченными кустарничково-сфагновыми и осоково-гипновыми тундрами (разрезы 1, 3). Лыдистая мерзлота вскрывается уже на глубине 35 см. Из-за постоянного переувлажнения оглеение охватывает минеральную часть сразу под органическим горизонтом. Весь профиль слабокислый или близкий к нейтральному при небольшой гидролитической кислотности (см. табл. 2, разрез 1), насыщенности основаниями и большом количестве органического вещества. По индексу окисленности явное оглеение выявляется в самом нижнем, глеевом горизонте.

Тип: Торфяно-глеезёмы

Торфяно-глеезём был обнаружен под небольшим участком полигональной тундры на второй надпойменной террасе р. Кыстыхтах (разрез 22). Отложения торфа под бугром и в мочажине сменялись мёрзлым лыдистым торфом на глубине 28 и 23 см, соответственно. Исходя из того, что поверхность полигональной тундры почти не возвышалась над прилегающей поверхностью с минеральными горизонтами и торфяная залежь не могла превышать 50 см, мы отнесли эти почвы к торфяно-глеезёмам, хотя весь профиль не был вскрыт. В торфе выделяется прослойка темно-серой супеси мощностью 5 см. Кроме того, верхний слой светло-бурой подстилки оказался сильно обогащён мелкозёмом, около 5% от объёма. Мелкозём органогенных отложений и прослойка супеси свидетельствуют о периодическом эоловом переносе. Прослойка супеси отличается высокой гидролитической кислотностью и слабой насыщенностью основаниями благодаря большой концентрации органического вещества и влиянию контакта с органогенными горизонтами.

Ствол: Синлитогенные

Отдел: Аллювиальные почвы

К аллювиальным почвам обследованной территории мы отнесли все почвы современной поймы и первой надпойменной террасы, минеральные отложения которой сохранили характерную аллювиальную слоистость.

Тип: Аллювиальные серогумусовые

Участки поймы крупных рек под ольховниками и ивняками злаково- и осоково-разнотравными заняты аллювиальными серогумусовыми типичными (разрез 24). Сниженные части поймы, под ивняками хвощёвыми, заняты аллювиальными серогумусовыми глееватыми (разрез 2). Подстилка пойменных аллювиальных почв либо маломощная, либо отсутствует. На первой надпойменной террасе крупных рек – Дудыпта и Кыстыхтах, с поверхностью на 2–3 м выше поймы, вышедшей из режима ежегодного паводка, растительность представлена сообществами, близкими к сообществам тундры, а в почвенном профиле вскрывается кровля многолетнемёрзлых пород.

На повышенных частях первой надпойменной террасы, под ивняково-осоковой моховой тундрой, почва аллювиальная серогумусовая глееватая (разрез 16). Сниженные участки первой надпойменной террасы заняты аллювиальной торфяно-минеральной почвой (разрез 15). Растительность сходная – ивняково-злаково-осоковая зеленомошная тундра. Слой тёмно-бурого торфа с мелкозёмом довольно мощный, до 10–20 см. Минеральная составляющая в органогенном горизонте свидетельствует о том, что первая надпойменная терраса не полностью вышла из поёмного режима.

Судя по обстоятельным работам по прилегающим территориям (Игнатенко, 1971), почвенный покров речных долин крупных рек территории, конечно, не ограничен изученными нами, и гораздо разнообразнее.

Обследованные аллювиальные почвы сильно- и среднекислые, включая органогенные горизонты, за исключением аллювиальной серогумусовой почвы в тыловой части поймы р. Кыстыхтах (разрез 24), кислотность которой слабая и в нижней части близка к нейтральной, что,

вероятно, связано с хорошей аэрированностью и небольшим содержанием органического вещества в песчаном аллювии. Здесь на поверхность аллювиальных отложений поступает суглинистый материал с прилегающего уступа второй надпойменной террасы, который частично формирует горизонт. При значительной гидролитической кислотности этого слоя весь профиль насыщен основаниями. Для профиля аллювиальных серогумусовых торфяно-минеральных почв первой надпойменной террасы и серогумусовых глееватых почв поймы свойственна сравнительно высокая гидролитическая кислотность и слабая насыщенность основаниями. Полученные коэффициенты окисленности в них не указывают на анаэробные условия в горизонтах с морфологическими признаками оглеения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В целом, на обследованной территории распространены почвы постлитогенного ствола, характерные для лесотундры Таймыра – криозёмы, подбуры и глеезёмы. Криозёмы наиболее характерны для восточной части территории, под преобладающими здесь лиственничными редколесьями и лесами, а также ерниками автоморфных позиций на почвообразующих суглинистых и супесчаных породах. В силу широкого распространения лёгких поверхностных отложений – камовых полей и водораздельных террас аллювиального генезиса, наиболее распространены почвы альфегумусового ствола – подбуры. В пятнистых тундрах на лёгких отложениях почвы этого типа образуют микрокомбинации, что отмечено и для тундр Европейской части (Горячкин, 2010).

По результатам нашего обследования, альфегумусовые почвы имеют гораздо большее распространение в западной и, особенно, центральной части территории, чем этого можно было бы ожидать исходя из картографического материала (Национальный атлас ..., 2011; Карта почвенно-экологического ... 2013; Soil Atlas ..., 2010), согласно которому в этой части территории преобладают гидроморфные почвы. Учитывая ограниченность наших исследований краевыми, наиболее дренированными частями террас, распространение подбуров может быть характерной чертой именно этих территорий. Предполагаем, что в центральных, более гидроморфных частях локальных водоразделов большую роль играют глеезёмы, отмеченные нами только на отрицательных формах рельефа.

Значительные участки террас под пятнистыми и кочкарными тундрами заняты почвенными микрокомплексами, связанными с криогенными процессами и описанными для соседних территорий. Особенности почвенных микрокомплексов авамской лесотундры – их развитие на лёгких отложениях, вплоть до связных песков, и обычно неясные границы элементов комплекса. Мы связываем это с положением территории на самой южной границе южных тундр со слабо выраженными криогенными процессами, особенно на лёгких отложениях.

Обращают на себя внимание сравнительно высокие значения коэффициента окисленности, даже тех горизонтов, которые диагностировались нами как глеевые или глееватые, существенно выше, приводимых, например, для криозёмов колымской тундры (Водяницкий и др., 2008). В большинстве случаев на условия окисления указывает только изменение значения коэффициента. В ряде случаев морфологическое определение оглеенности не подтверждается значением коэффициента, особенно на лёгких отложениях. Это может объясняться окислением почвенных образцов на фоне общего низкого содержания оксидов железа.

В большинстве случаев обследованные почвы отличаются высокой насыщенностью основаниями, что может быть связано с близостью траппов Путоран, которые способствуют высокой емкости поглощения почв и насыщенности их поглощающего комплекса основаниями (Василевская, 1980).

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ по государственному заданию Института почвоведения и агрохимии СО РАН (проект № 121031700316-9) и НИИ сельского хозяйства и экологии Арктики – филиал ФИЦ КНЦ СО РАН (проект № FWES-2022-0008).

ЛИТЕРАТУРА

- Афанасьева Т.В., Василенко В.И., Терешина Т.В., Шеремет Б.В. Почвы СССР. Москва: Мысль, 1979. 380 с.
- Богатырев Л.Г., Василевская В.Д., Иванов В.В. К характеристике температурного режима тундровых почв (Западный Таймыр) // Научные доклады высшей школы. Биологические науки. 1971. № 10 (94). С. 105–109.
- Василевская В.Д. Почвообразование в тундрах Средней Сибири. Москва: Наука, 1980. 235 с.

- Водяницкий Ю.Н., Мергелов Н.С., Горячкин С.В. Диагностика оглеения в условиях низкого содержания оксидов железа (на примере почв тундры Колымской низменности) // Почвоведение. 2008. № 3. С. 261–279.
- Водяницкий Ю.Н. Железо в гидроморфных почвах. Москва: МГУ, 2017. 157 с.
- Горячкин С.В. Почвенный покров Севера (структура, генезис, экология, эволюция). Москва: ГЕОС, 2010. 414 с.
- ГОСТ 12536-2014. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава. Москва: Стандартинформ, 2015.
- ГОСТ 26212-91. Почвы. Определение гидролитической кислотности по методу Каппена в модификации ЦИНАО. Москва: Комитет стандартизации и метрологии СССР, 1993.
- ГОСТ 26213-2021. Почвы. Методы определения органического вещества. Москва: Российский институт стандартизации, 2021.
- ГОСТ 26483-85. Почвы. Приготовление солевой вытяжки и определение ее pH по методу ЦИНАО. Москва: Государственный комитет СССР по стандартам, 1986.
- ГОСТ 26487-85. Почвы. Определение обменного кальция и обменного (подвижного) магния методами ЦИНАО. 1986 Москва: Государственный комитет СССР по стандартам, 1986.
- ГОСТ 27395-87. Почвы. Метод определения подвижных соединений двух- и трехвалентного железа по Веригиной-Аринушкиной. Москва: Госстандарт СССР, 1988.
- ГОСТ 27784-88. Почвы. Метод определения зольности торфяных и оторфованных горизонтов почв. Москва: Госстандарт СССР, 1989.
- Губин С.В., Лупачев А.В. Почвообразование и подстилающая мерзлота // Почвоведение. 2008. № 6. С. 655–667.
- Губин С.В., Лупачев А.В. Надмерзлотные горизонты аккумуляции грубого органического вещества в криоземах тундр Северной Якутии // Почвоведение. 2018. № 7. С. 815–825. <https://doi.org/10.1134/S0032180X18070043>
- Десяткин Р.В., Лесовая С.Н., Оконешникова М.В., Иванова А.З. Криоземы и палевые слабодифференцированные почвы тундр и тайги Якутии: свойства, минералогический состав и классификация // Почвоведение. 2021. № 12. С. 1423–1436. <https://doi.org/10.31857/S0032180X21120042>
- Десяткин Р.В., Иванова А.З., Оконешникова М.В., Десяткин А.Р., Филиппов Н.В. Почвы криогенных форм микрорельефа тундровой и лесотундровой зон Северо-Восточной Якутии // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2022. Том 27. № 1. С. 98–108. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-1-98-108>
- Ершов Ю.И. Почвенно-географическое районирование Красноярского края // География и природные ресурсы. 1998. № 2. С. 110–118.
- Ершов Ю.И., Москалев А.К., Степень Р.А. Земельные и лесные ресурсы Красноярского края, проблемы их рационального использования. Новосибирск: СО РАН, 2001. 114 с.
- Ершов Ю.И. Криогенные почвы на породах трапповой формации Центральной Сибири // Почвоведение. 2022. № 6. С. 657–672. <https://doi.org/10.31857/S0032180X22060053>
- Иванова А.З., Десяткин Р.В. Криоземы бассейна р. Алазея // Наука и образование. 2011. № 2. С. 70–73.
- Игнатенко И.В. Почвы основных типов тундровых биогеоценозов Западного Таймыра (на примере стационара Ботанического института АН СССР) // Биогеоценозы таймырской тундры и их продуктивность. Ленинград: Наука. 1971. С. 57–107.
- Игнатенко И.В. Классификация почв таймырской тундры // Биогеоценозы таймырской тундры. Ленинград: Наука, 1980. С. 26–46.
- Карта почвенно-экологического районирования Российской Федерации. Масштаб 1:2500000 / Науч. редактор: Г.В. Добровольский, И.С. Урусевская. Москва: “Талка+”, 2013.
- Классификация и диагностика почв России / Авторы и составители: Л.Л. Шишов, В.Д. Тонконогов, И.И. Лебедева, М.И. Герасимова. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
- Лазарева М.А. Оценка физических параметров подбуров иллювиально-гумусовых глеевых, сформированных в условиях северо-востока Карельского перешейка // Материалы по изучению русских почв. Вып. 7 (34): Сборник научных докладов / Под ред. Б.Ф. Апарина. Санкт-Петербург: Издательство Санкт-Петербург университета, 2012. С. 95–99.
- Мергелов Н.С., Таргульян В.О. Процессы накопления органического вещества в минеральной толще мерзлотных почв приморских низменностей Восточной Сибири // Почвоведение. 2011. № 3. С. 275–287.

Мировая система почвенной классификации для диагностики почв и создания легенд почвенных карт. Исправленная и дополненная версия 2015 / Перевод: И.А. Спиридоновой; Под редакцией: М.И. Герасимовой и П.В. Красильникова. Москва: ФАО/МГУ им. М.В. Ломоносова, 2017. 203 с.

Национальный атлас почв Российской Федерации. Москва: Астрель, АСТ, 2011. 632 с.

Погода и климат. URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/archive.php> (дата обращения 22.02.2024).

Полевой определитель почв. Москва: Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 2008. 182 с.

Раковская Э.М., Давыдова М.И. Физическая география России. Часть 1–2. Москва: Владос, 2001. 288 с.

Сакс В.Н. К геоморфологии бассейна реки Пясины // Труды Горно-геологического управления ГУ СМП. 1945. Выпуск 21. С. 44–58.

Сеньков А.А. Особенности почвенного покрова подгольцового пояса плато Путорана // Сибирский экологический журнал. 2014. Том 21. № 6. С. 845–854.

Соколов И.А., Коношков Д.Е. Почвы и почвенный покров северной циркумполярной области // Почвоведение. 1998. № 11. С. 1303–1317.

Таймыро-Североземельская область. Ленинград: Гидрометеиздат, 1970. 374 с.

Таргульян В.О. Почвообразование и выветривание в холодных гумидных областях. Москва: Наука, 1971. 268 с.

Федоров А.С. Горячкин С.В., Касаткина Г.А., Федорова Н.Н. География почв: учеб. пособие. Санкт-Петербург: Издательство Санкт-Петербург университета, 2013. 256 с.

Хромов С.П., Петросянц М.А. Метеорология и климатология. Москва: Издательство Московского университета, 2006. 582 с.

Soil Atlas of the Northern Circumpolar Region / A. Jones, V. Stolbovoy, C. Tarnocai, G. Broll, O. Spaargaren, L. Montanarella (eds.). Luxembourg: European Commission, 2010. 144 p.
<http://eusoiils.jrc.ec.europa.eu/library/maps/Circumpolar/Download.cfm>

Поступила в редакцию 19.03.2024

Принята 15.07.2024

Опубликована 15.07.2024

Сведения об авторах:

Махатков Игорь Дмитриевич – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории географии почв ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск, Россия); makhatkov@issa-siberia.ru и старший научный сотрудник Научно-исследовательского института сельского хозяйства и экологии Арктики – филиал ФИЦ КНЦ СО РАН (Норильск; Россия); norilskniiks@mail.ru

Смоленцев Борис Анатольевич – кандидат биологических наук, заведующий лабораторией географии и генезиса почв ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск, Россия); smolentsev.b@issa-siberia.ru

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.



Статья доступна по лицензии [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Soils of the Avam forest-tundra (Southwestern Taimyr)

© 2024 I. D. Makhatkov ^{1,2}, B. A. Smolentsev ¹

¹*Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Lavrentieva 8/2, Novosibirsk, Russia. E-mail: makhatkov@issa-siberia.ru; smolentsev.b@issa-siberia.ru*

²*Scientific-Research Institute of Agriculture and Ecology of the Arctic – Division of Federal Research Center “Krasnoyarsk Scientific Center of the Siberian Branch of the RAS”, Komsomolskaya str., 1, Norilsk, Russia. E-mail: norilskniiks@mail.ru*

The purpose of the study was to describe the common characteristics of the soil cover of the poorly studied territory of the Avam tundra.

Location and time of the study. The soil survey was conducted during the summer season (end of July – mid of August) 2021 in the North Siberian lowland in the middle Dudypta River, 45–60 km to the north of the Central Siberian Plateau.

Methodology. Soil pits (24) were dug at three key sites, in the most typical habitats. The main soil chemical properties were determined in 53 samples from 13 pits.

The main results. The soils of automorphic conditions were identified as Cryosols on the loams and as Arenosols on sands and sandy loams. Under difficult drainage, Gleyic subtypes of these soils or Gleysols are common. Zonal Cryosols are more typical for larch woodlands mostly in the eastern part of the territory. Arenosols are distributed mainly on the sandy siltloam in the eastern part, and on the second above-floodplain terrace of Dudypta and Kystykhtakh. Arenosols microcomplexes are common for the spotted tundra of the second above-floodplain terraces. On sandy loam and loamy sediments, upper gleyic layer is formed under the spots. These soils are interbedded with upper gleyic Cryosols. The floodplains are occupied by Humic Fluvisols, and Histic Gleyic Fluvisols of the first floodplain terrace.

Conclusion. In general, the soils, typical of the Taimyr forest-tundra, are common in the surveyed territory. Given the limitations of our research on the most drained parts of the terraces, the location of podburs may be a characteristic feature of this particular part of the terraces. It can be assumed that in the central, more hydromorphic parts of the local watersheds, the Gleysols are more common.

Keywords: North Siberian lowland; Dudypta River; soil cover.

How to cite: Makhatkov I.D., Smolentsev B.A. Soils of the Avam forest tundra (Southwestern Taimyr). *The Journal of Soils and Environment*. 2024. 7(2). e255. DOI: [10.31251/pos.v7i2.255](https://doi.org/10.31251/pos.v7i2.255) (in Russian with English abstract).

FUNDING

The study was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. 121031700316-9 and FWES-2022-0008).

REFERENCES

- Afanasyeva T.V., Vasilenko V.I., Tereshina T.V., Sheremet B.V. Soils of the USSR. Moscow: Mysl Publ., 1979. 380 p. (in Russian).
- Bogatyrev L.G., Vasilevskaya V.D., Ivanov V.V. To characterize the temperature regime of tundra soils (Western Taimyr). *Nauchnyye Doklady Vysshey Shkoly. Biologicheskiye Nauki*. 1971. No. 10 (94). P. 105–109. (in Russian).
- Vasilevskaya V.D. Soil formation in the tundras of Central Siberia. Moscow: Nauka Publ., 1980. 235 p. (in Russian).
- Vodyanitsky Yu.N., Mergelov N.S., Goryachkin S.V. Diagnostics of gleying under conditions of low iron oxide content (using the example of tundra soils of the Kolyma Lowland). *Pochvovedenie*. 2008. No. 3. P. 261–279. (in Russian).
- Vodyanitsky Yu.N. Iron in hydromorphic soils. Moscow: Moscow State University, 2017. 157 p. (in Russian).
- Goryachkin S.V. Soil cover of the North (patterns, genesis, ecology, evolution). Moscow: GEOS Publ., 2010. 414 p. (in Russian).
- GOST 12536-2014. Soils. Methods of laboratory granulometric (grain-size) and microaggregate distribution. Moscow: Standardinform, 2015. (in Russian).
- GOST 26212-91. Soils. Determination of hydrolytic acidity by Kappen method modified by CINAO. Moscow: USSR Committee for Standardization and Metrology, 1993. (in Russian).
- GOST 26213-2021. Soils. Methods for determination of organic matter. Moscow: Russian Institute of Standardization, 2021. (in Russian).
- GOST 26483-85. Soils. Preparations of salt extract and determination of its pH by CINAO method. Moscow: USSR National Committee on Standards, 1986. (in Russian).
- GOST 26487-85. Soils. Determination of exchangeable calcium and exchangeable (mobile) magnesium by CINAO methods. Moscow: USSR National Committee on Standards, 1986. (in Russian).
- GOST 27395-87. Soils. Determination of mobile two-trivalent iron compounds after Verigina Arinushkina. Moscow: USSR Gosstandart, 1988. (in Russian).
- GOST 27784-88. Soils. Method for determination of ash content in peat and peat-containing soil horizons. Moscow: USSR Gosstandart, 1989. (in Russian).

- Gubin S.V., Lupachev A.V. Soil formation and the underlying permafrost. *Eurasian Soil Science*. 2008. Vol. 41. No. 6. P. 574–585. <https://doi.org/10.1134/S1064229308060021>
- Gubin S.V., Lupachev A.V. Suprapermafrost horizons of the accumulation of raw organic matter in tundra cryozems of Northern Yakutia. *Eurasian Soil Science*. 2018. Vol. 51. No. 7. P. C. 772–781. <https://doi.org/10.1134/S1064229318070049>
- Desyatkin R.V., Lessovaia S.N., Okoneshnikova M.V., Ivanova A.Z. Cryosols from Tundra and Taiga Zones of Yakutia: Properties, Clay Mineralogy, and Problems of Classification. *Eurasian Soil Science*. 2021. Vol. 54. No. 12. P. 1783–1794. <https://doi.org/10.1134/S1064229321120048>
- Desyatkin R.V., Ivanova A.Z., Okoneshnikova M.V., Desyatkin A.R., Filippov N.V. Soils of cryogenic forms of the tundra and forest-tundra zones microrelief in the North-Eastern Yakutia. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2022. Vol. 27. No. 1. P. 98–108. (in Russian). <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-1-98-108>
- Ershov Yu.I. Soil-geographical zoning of the Krasnoyarsk Territory. *Geografia i prirodnye resursy*. 1998. No. 2. P. 110–118. (in Russian).
- Ershov Yu.I., Moskalev A.K., Stepen R.A. Land and forest resources of the Krasnoyarsk Territory, problems of their rational use. Novosibirsk: Publ. House SB RAS, 2001. 114 p. (in Russian).
- Yershov Y.I. Cryogenic Soils on the Trappean Rocks of Central Siberia. *Eurasian Soil Science*. 2022. Vol. 55. No. 6. P. 695–709. <https://doi.org/10.1134/S1064229322060059>
- Ivanova A.Z., Desyatkin R.V. Cryozems of the river basin Alazeya. *Nauka i obrazovaniye (Science and Education)*. 2011. No. 2. P. 70–73. (in Russian).
- Ignatenko I.V. Soils of the main types of tundra biogeocenoses of Western Taimyr (on the example of the hospital of the Botanical Institute of the USSR Academy of Sciences). In book: *Biogeocenoses of the Taimyr tundra and their productivity*. Leningrad: Nauka Publ., 1971. P. 57–107. (in Russian).
- Ignatenko I.V. Classification of soils of the Taimyr tundra. In book: *Biogeocenoses of the Taimyr tundra*. Leningrad: Nauka Publ., 1980. P. 26–46. (in Russian).
- Map of soil-ecological zoning of the Russian Federation. Scale 1:2500000. G.V. Dobrovolsky, I.S. Urusevskaya (sci. ed.). Moscow: “Talka+”, 2013.
- Soil classification and diagnostic of Russia / Authors and compilers: L.L. Shishov, V.D. Tonkonogov, I.I. Lebedeva, M.I. Gerasimov. Smolensk: Oykumena Publ., 2004. 342 p. (in Russian).
- Lazareva M.A. Assessment of the physical parameters of illuvial-humus gley podburs formed in the conditions of the northeast of the Karelian Isthmus. *Materials on the study of Russian soils*. Vol. 7 (34): Collection of scientific reports / Edited by B.F. Aparin. St. Petersburg: St. Petersburg University Press, 2012. C. 95–99. (in Russian).
- Mergelov N.S., Targulian V.O. Accumulation of organic matter in the mineral layers of permafrost-affected soils of coastal lowlands in East Siberia. *Eurasian Soil Science*. 2011. Vol. 44. No. 3. P. 249–260. <https://doi.org/10.1134/S1064229311030069>
- World soil classification system for soil diagnostics and creation of soil map legends. Corrected and supplemented version 2015 / Translation by I.A. Spiridonova; Edited by M.I. Gerasimova and P.V. Krasilnikov. Moscow: FAO/ Lomonosov Moscow State University, 2017. 203 c. (in Russian).
- National Atlas of Soils of the Russian Federation. Moscow: Astrel, AST, 2011. 632 p. (in Russian).
- Weather and climate. URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/archive.php> (accessed on 22.02.2024). (in Russian).
- Field guide for Russian soil. Moscow: Dokuchaev Soil Science Institute, 2008. 182 p. (in Russian).
- Rakovskaya E.M., Davydova M.I. Physical geography of Russia. Part 1–2. Moscow: Vldos, 2001. 288 p. (in Russian).
- Saks V.N. On the geomorphology of the Pyasina River basin. *Proceedings of the Mining and Geological Department GU SMP*. 1945. Issue 21. P. 44–58. (in Russian).
- Senkov A.A. Peculiarities of soil cover in the subalpine belt of the Putorana plateau. *Contemporary Problems of Ecology*. 2014. Vol. 7. No. 6. P. 628–635. <https://doi.org/10.1134/S1995425514060122>
- Sokolov I.A., Konyushkov D.E. Soils and soil cover of the northern circumpolar region. *Pochvovedenie*. 1998. No. 11. P. 1303–1317. (in Russian).
- Taimyr-Severozemelskaya region. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1970. 374 p. (in Russian).
- Targulyan V.O. Soil formation and weathering in cold humid areas. Moscow: Nauka Publ., 1971. 268 p. (in Russian).

Fedorov A.S. Goryachkin S.V., Kasatkina G.A., Fedorova N.N. Geography of soils: textbook. St. Petersburg: St. Petersburg University Publishing House, 2013. 256 p. (in Russian).

Khromov S.P., Petrosyants M.A. Meteorology and climatology. Moscow: Moscow University Publishing House, 2006. 582 p. (in Russian).

Soil Atlas of the Northern Circumpolar Region / A. Jones, V. Stolbovoy, C. Tarnocai, G. Broll, O. Spaargaren, L. Montanarella (eds.). Luxembourg: European Commission, 2010. 144 p.
<http://eusoiils.jrc.ec.europa.eu/library/maps/Circumpolar/Download.cfm>

Received 19 March 2024

Accepted 15 July 2024

Published 15 July 2024

About the authors:

Igor D. Makhatkov – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher in the Institute of Soil Science and Agrochemistry, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); makhatkov@issa-siberia.ru and Senior Researcher in the Scientific-Research Institute of Agriculture and Ecology of the Arctic – Division of Federal Research Center “Krasnoyarsk Scientific Center of the Siberian Branch of the RAS” (Norilsk, Russia); norilskniiks@mail.ru

Boris A. Smolentsev – Candidate of Biological Sciences, Head of the Laboratory of geography and genesis of soils in the Institute of Soil Science and Agrochemistry, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); smolentsev.b@issa-siberia.ru

The authors read and approved the final manuscript



The article is available under [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

ПРИЛОЖЕНИЕ

Разрез 1

93°42'33,82" в.д., 71°03'29,99" с.ш.

Тыловая часть надпойменной террасы ручья. Поверхность выположена, небольшим уклон (0,5°) в сторону русла.

Растительность: заболоченная кустарниково-моховая тундра.

*Почва: глеезём иллювиально-ожелезнённый (Ferric Gleysols).

	O	0–3	Рыжеватый очёс мхов (сфагновые и гипновые). Свежий. Много корней. Переход ясный, ровный.
	T	3–10	Тёмно-коричневый торф среднеразложенный. Много корней. Мажется. Переход резкий, ровный.
	Gf	10–14	Охристая супесь. Местами ржавые пятна. Сочится вода. Корни редкие. Переход неясный, плавный.
	G	14–35	Сизовато-серая супесь, местами ржавые пятна. Местами - включения органики (торф с неразложившимися остатками растений). Мокрая. Корней нет.
	CG _L	35 и ниже	Та же супесь, мёрзлая. Мерзлота льдистая.

Примечание.

*Здесь и далее во всех разрезах диагностика почв и индексация генетических горизонтов приведены согласно «Классификация и диагностики почв России» (2004) и «Полевой определитель почв» (2008). В скобках даны названия почв в соответствии с Мировой реферативной базой почвенных ресурсов 2014 – IUSS Working Group WRB 2014 (Мировая система ..., 2017).

Разрез 2

93°42'40,76" в.д., 71°03'31,26" с.ш.

Пойма р. Нерпалах. Поверхность выположена, нанорельеф не выражен.

Растительность: ивняк из *Salix lanata* осоковый.

Почва: аллювиальная серогумусовая глееватая (Humic Gleyic Fluvisols).

	AY	0–33	Песчаный охристо-серый аллювий. Местами – коричневые пятна. Бесструктурный. Влажный. Много корней осок и ив. Переход ясный, довольно резкий.
		C ^g	33–55
			

Разрез 3

93°42'22,90" в.д., 71°03'04,43" с.ш.

Заложен в заболоченной ложбине небольшого ручья. Нанорельеф не выражен.

Растительность: осоково (*Carex rariflora*)-гиновая (*Loeskyrnum badium*) группировка.

Почва: глеезём иллювиально-ожелезнённый (Ferric Gleysols).

	T	0–10	Бурый торф, слабо разложившийся. В нижней части – ржавые пятна. На нижней границе чёрный (угли). Много корней. Переход ясный, резкий.
	Gf	10–24	Коричневато-бурый, ниже - оливковый песок. Мокрый. Корней мало. В нижней части тёмно-коричневый. Граница ясная, волнистая, слабо языковатая.
	G	24–35	Сизовато-серый песок. Мокрый. Местами – неясные редкие охристые пятна. Корней нет.
			

Разрез 4

93°42'20,60" в.д., 71°03'02,90" с.ш.

Заложен на склоне увала (кама), северо-восточный склон с уклоном 3°. Нанорельеф не выражен.

Растительность: шикшево-ивняково-арктофиловая тундра с единичными лиственницами.

Почва: подбур иллювиально-железистый оподзоленный (Ferric Albic Arenosols).

	ВНFe	0–8	Светло-коричневый песок, в верхней части слегка палевый. Корней мало. Свежий. Мощность горизонта варьирует от 5 до 12 см. Местами – тёмно-коричневый (угли?). Переход ясный, волнистый.
	BF	8–32	Охристый песок с тёмно-коричневыми пятнами и полосами. Корней мало. Свежий. Окатанная галька около 5%. Переход ясный, ровный.
	BCf	32–52	Охристо-светло-серый песок. Галька примерно 1%. Корней нет. Свежий. Местами охристые полосы. Охристость книзу убывает. Переход неясный, плавный.
	C	52–80	Светло-серый слоистый песок. Свежий. Слои серые и светло-серые.
			

Разрез 5

93°43'11,03" в.д., 71°02'50,21" с.ш.

Юго-восточный пологий склон увала с уклоном около 0,5°. Нанорельеф представлен редкими пятнами выливания, окаймлённых валиками, ветровальными комплексами с характерными буграми и западинами.

Растительность: лиственничное ерниковое хвощёвое лишайниково-зеленомошное редколесье.

Почва: криозём типичный (Haplic Cryosols).

	O	0–4	Бурая подстилка с очёсом зелёных мхов. Влажная. Много корней. Переход ясный, плавный.
	OT	4–10	Тёмно-бурая оторфованная подстилка. Влажная. Много корней. Переход ясный, ровный.
	CRhi	10–20	Охристо-коричневая супесь, липкая, тиксотропная, беструктурная. Окатанная галька около 1%. Влажная. Корней мало. Переход плавный, условный.
	Cf	20–50	Охристо-серая супесь. Влажная. Бесструктурная. Местами сочится вода. Местами прослойки тёмно-коричневой органики и тёмно-серые пятна. Корней мало. Окатанная галька около 1%.
			

Разрез 6

93°43'26,50" в.д., 71°02'47,50" с.ш.

Заложен на южном пологом склоне увала (0,5°). Нанорельеф выражен слабо, в основном ветровальными комплексами.

Растительность: лиственничное ерниково-багульниковое мохово-лишайниковое редколесье.

Почва: криозём палево-метаморфизированный (Haplic Cambic Cryosols).

	O	0–4	Тёмно-бурая подстилка с очёсом мхов и дернинами осок. Свежая. Много корней. Переход ровный, ясный.
	OT	4–5	Тёмно-серая, почти чёрная подстилка, оторфованная (угли). Много корней. Влажная. Переход резкий, ровный.
	CRpl	5–20	Светло-серый, палевый суглинок. Бесструктурный. Влажный. Корней мало. Переход ровный, плавный, условный.
	CR	20–50	Охристо-серый суглинок. Местами на разломе отслаивается пластинками и зёрнами. Местами охристые пятна. Влажный. Корней мало. Переход ровный, условный.
	C	50–70	Серый суглинок. Комковатый на разломе. Влажный. По всему профилю окатанная галька, < 1%.
			

Разрез 7

93°43'13,10" в.д., 71°02'48,60" с.ш.

Заложен на юго-восточном пологом склоне увала (0,5°) на пятне выливания. Нанорельеф представлен редкими пятнами выливания, окаймлёнными валиками, ветровальными комплексами с характерными буграми и западинами.

Растительность: лиственничное ивняково-ерниковое осочково (*Carex redowskiana*)-лишайниково-моховое редколесье. На месте закладки разреза подстилка полностью отсутствует.

Почва: криозём типичный (Haplic Cryosols).

	CR	0–20	Охристо-серый суглинок. Бесструктурный. Тиксотропный. Местами – охристые и сизоватые пятна. Влажный. Корней мало. Переход неясный, условный.
	С	20–50	Охристо-серый суглинок. На разломе неясно пластинчатый. Немного суше верхнего горизонта. Корней практически нет. Окатанная галька, меньше 1%.

Разрез 8

93°43'21,50" в.д., 71°03'21,80" с.ш.

Заложен на южном пологом склоне увала (0,3°). Микрорельеф остаточного-полигонального. На пятнах пучения – почти сплошной покров накипных лишайников.

Растительность: ерник хвощёво-осочково-кустарничковый лишайниково-зеленомошный с подростом лиственницы.

Почва: криозём типичный (Haplic Cryosols).

	O	0–2	Тёмно-бурая подстилка с очёсом мхов и дернинами осок, слабо разложенная. Мощность горизонта местами до 10 – 12 см, местами полностью отсутствует, только корка накипных лишайников. Переход ровный, резкий.
	CRhi	2–9	Охристо-коричневая супесь с галькой, около 0.5%. Местами осветлённые палевые пятна. Бесструктурная. Свежая. Много корней. Переход неясный, условный.
	CRf	9–30	Охристо-тёмно-серая супесь с прослойками суглинка. Галька, около 0.5%. Прослойки суглинка тёмно-сизые с ржавыми пятнами. Корней много. Переход неясный, условный.
	CR	30–72	Светло-серая супесь с ржавыми разводами, прослойками песка. Галька, около 1%. В нижней надмерзлотной части тёмно-серые пятна. Местами пятна погребённой органики.
	С ₁	72	Та же супесь, мёрзлая. Мерзлота сухая.

Разрез 9

93°42'53,38" в.д., 71°03'39,32" с.ш.

Заложен на юго-западном склоне гравийно-песчаного кама, уклон 10°.

Растительность: разрозненные синузии *Thymus reverdattoanus*, *Saxifraga spinulosa*, *Festuca ovina*, *Equisetum arvense*.

Почва: подбур иллювиально-железистый (Ferric Arenosols).

	B	0–5	Окатанная галька и песок (10%). переход плавный.
	BF	5–15	Охристо-бурый песок с галькой (5%). Нижняя граница затёками до 20 см. Переход ясный, волнистый.
	C	15–51	Серый песок. Местами коричневатые разводы.
			

Разрез 10

93°42'52,70" в.д., 71°03'38,00" с.ш.

Заложен у подножья кама на галечно-песчаном делювии, склон западной экспозиции с уклоном 1–2°. Нанорельеф не выражен.

Растительность: хвощёво-кустарничковая мохово-лишайниковая тундра с единичными лиственницами.

Почва: подбур иллювиально-железистый глееватый (Ferric Gleyic Arenosols).

	ВН	0–4	Тёмно-бурый песок. Мокрый. Много корней. Переход ясный, волнистый, затёками до 30 см.
	ВFg	4–12	Охристо-бурый песок. Мокрый. Много корней. Переход ясный, неровный, затёками до 20 см.
	BCg	12–35	Охристо-серый песок. Мокрый. Корней мало. Переход неясный.
	Cg	35–50	Серый песок с охристыми пятнами. Мокрый. По всему профилю галька, примерно 5%.

Разрез 11

93°42'52,70" в.д., 71°03'38,00" с.ш.

Разрез заложен на западном склоне увала 1–3°. Нанорельеф не выражен.

Растительность: лиственничное ерниково-хвощёвое зеленомошное редколесье.

Почва: криозём типичный (Haplic Cryosols).

	O	0–6	Бурая, слабо разложенная подстилка. В нижней части слой около 1 см – тёмно-бурая, местами почти чёрная. Переход ровный, ясный, резкий.
	CRhi	6–14	Коричневато-светло-серый лёгкий суглинок. По верхней границе тёмно-серые, местами почти чёрные затёки до 0,5–1 см. По горизонту местами коричневые и палевые пятна, охристые пятна. Много корней. Переход плавный, неясный.
	CR	14–35	Охристо-серый суглинок. Разламывается неясными пластинками. Корней мало. Переход ясный, ровный.
	C	35–53	Тёмно-серый суглинок. Местами расслаивается гранулами 2–3 мм. Липкий. Влажный. Корней мало. По всему профилю галька, около 1%.
			

Разрез 12

92°39'37,60" в.д., 71°13'14,50" с.ш.

Заложен на второй надпойменной террасе р. Дудыпта. Поверхность пологая с небольшим уклоном на юго-восток в 1° в сторону оврага. Нанорельеф слабо выражен.

Растительность: кустарничковая лишайниковая тундра.

Почва: подбур иллювиально-гумусовый глееватый (Humic Gleyic Arenosols).

	О	0–4	Тёмно-бурая, оторфованная лишайниковая подстилка, очёс мхов. Много корней. Переход резкий, ровный.
	ВНf	4–20	Коричневый песок, в верхней части – затёками от 1 до 6 см, до тёмно-коричневого, почти чёрного. Много корней. Переход волнистый, затёками до 2–40 см.
	ВСg	20–50	Сизовато-серый песок. Местами ржавые пятна и разводы. Местами тёмно-коричневые пятна погребённой органики. Мокрый. Корней мало. В нижней части переувлажнён, сочится вода. Переход резкий, ровный.
	С1	50–60	Мёрзлый сизый песок с вкраплениями органики. Местами охристые и ржавые пятна. Местами тёмно-сизый. Мерзлота сухая.

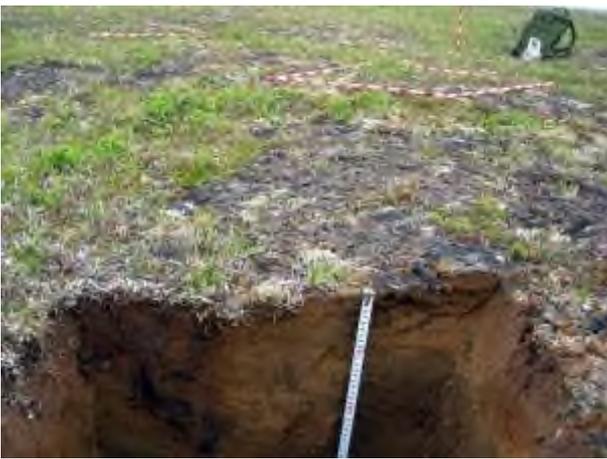
Разрез 13

92°39'25,50" в.д., 71°13'25,00" с.ш.

Заложен на второй надпойменной террасе р. Дудыпта. Рельеф слабо-пологоволнистый. Нанорельеф в виде пятен, приподнятых валиков и основной поверхности.

Растительность: пятнистая тундра – пятна песка, заросшие криптогамными корками; на валиках и основной поверхности кустарничково-цетрариевая тундра.

Почва: подбур иллювиально-железистый глееватый (пятно) и подбур иллювиально-гумусовый турбирированный (валик) (Ferric Gleyic Arenosols + Humic Turbic Arenosols).

	Пятно		
	BF	0–32	Охристый песок. Влажный. Много корней. Переход условный.
	BCg	32–70	Охристый песок. Местами небольшие, 2 – 5 см, хорошо очерченные сизые пятна неправильной формы и ржавые неясные разводы. Мокрый. Местами оплывает. Корней мало. Переход плавный, неясный.
	Cg	70–110	Охристо-серый песок. Местами неясные ржавые разводы. Корней нет. Переход резкий.
	C ₁	110–120	Мёрзлый охристый песок. Мерзлота сухая.
	Валик		
	O	0–2	Бурая подстилка, с корнями и корневищами, очёс зелёных мхов. Переход резкий, ясный.
	BH	2–15	Коричневый песок, книзу постепенно светлеет до охристого. Влажный. Много корней. Переход ясный.
	[BF +BH]tr	15–30	Охристый песок с вихревым рисунком, яркие ржавые разводы, чёрные углистые пятна и включения грубого гумуса. Мокрый. Местами оплывает. Корней мало. Переход плавный, неясный.
	BCg	30–70	Охристый песок. Местами ржавые неясные разводы. Мокрый. Местами оплывает. Корней мало. Переход плавный, неясный.
	Cg	70–110	Охристо-серый песок. Местами неясные ржавые разводы. Корней нет. Переход резкий.
	C ₁	110–120	Мёрзлый охристый песок. Мерзлота сухая.

Разрез 14

92°39'02,90" в.д., 71°13'13,20" с.ш.

Заложен на второй надпойменной террасе р. Дудыпта. Поверхность выположена. Нанорельеф выражен в виде кочек *Eriophorum vaginatum*.

Растительность: пушицево (*Eriophorum vaginatum*) – кустарничковая лишайниково-моховая тундра. Мерзлота под кочкой ниже на 6–7 см.

Почва: подбур иллювиально-гумусовый поверхностно-глеевый (пятно, понижение) и подбур иллювиально-гумусовый (кочка) (Humic Epigleyic Arenosols + Humic Arenosols).

	Пятно		
	О	0–6	Оторфованная тёмно-серая подстилка с очёсом мхов. В нижней части почти чёрная. Переход резкий, ровный.
	ВН	6–18	Тёмно-серый коричневатый песок. В верхней части прерывистый слой тёмно-коричневого песка, от 0 до 3 см. Ниже цвет ровный. Местами ржавые пятна. Корней довольно много. Переход ясный, волнистый.
	G	18–32	Сизовато-серый песок с ржавыми и коричневыми прослойками по нижней границе. Влажный. Корней мало. Переход резкий, ровный.
	BFg	32–38	Коричневато-серый песок с ржавыми и коричневыми прослойками. Небольшие включения сизовато-серого песка. Влажный. Корней мало. Переход резкий, ровный.
	Cg±	38–40	Мерзлый сизовато-серый песок с ржавыми и коричневыми разводами. Мерзлота сухая.
	Кочка		
	О	0–8	Оторфованная тёмно-серая подстилка с очёсом мхов. В нижней части почти чёрная. Переход резкий, ровный.
	ВН	8–25	Тёмно-серый песок. В верхней части тёмно-коричневый. Ниже цвет ровный. Корней довольно много. Переход ясный, волнистый.
	BFg	25–45	Тот же, что и под пятном
	Cg±	45–48	Тот же, что и под пятном

Разрез 15

92°39'14,26" в.д., 71°12'55,54" с.ш.

Заложен на сниженном участке первой надпойменной террасы р. Дудыпта, в 12 м от берега. Поверхность вышоложена, нанорельеф не выражен.

Растительность: ивняк злаково-осоковый зеленомошный.

Почва: аллювиальная торфяно-глеевая (Histic Gleyic Fluvisols).

	Т	0–15	Тёмно-бурый, среднеразложившийся торф и очёс мхов. В толще торфа много мелкозёма. Много корней. Свежий. Мощность горизонта в разных местах от 10 до 20 см. В местах малой мощности горизонта мерзлота ниже на 4–5 см. Переход резкий, ровный.
	G	15–30	Сизовато-серый песчаный аллювий. Местами ржавые разводы и тёмно-коричневые пятна. Встречаются сизоватые пятна с мелкозёмом. Много корней. Переход ясный, волнистый, резкий.
	Сg ⁻¹	30–35 и ниже	Мёрзлый сизоватый песок. Мерзлота льдистая. Много ржавых разводов. Встречаются органические остатки.

Разрез 16

92°39'16,23" в.д., 71°12'55,26" с.ш.

Заложен на повышенном участке первой надпойменной террасе р. Дудышта, в 18 м от берега. Поверхность выположена, нанорельеф не выражен.

Растительность: ивковая злаково-осоковая моховая тундра.

Почва: аллювиальная серогумусовая глееватая (Humic Gleyic Fluvisols).

	O	0–5	Тёмно-бурая, слаборазложившаяся подстилка и очёс мхов. Свежая. Много корней. По всей толще довольно много песка. Переход резкий, ровный.
	AYhi	5–20	Коричневая супесь, комковатая, к низу постепенно светлеет. Много корней. Переход ясный, неровный, затёками от 15 до 23 см глубины.
	Cfg	20–44	Слоистый охристый песок. Местами ржавые и сизоватые пятна. Свежий. Корней мало. К низу количество ржавых разводов и сизоватых пятен становится больше. Переход ровный, плавный.
	Cg	44–61	Тёмно-серый песок, местами сизоватый. Корней нет. Сплошные ржавые разводы по всей толще. Переход резкий, ровный.
	Cg±	61–65	Тот же песок, мёрзлый. Мерзлота сухая.
			

Разрез 17

92°40'18,60" в.д., 71°13'01,70" с.ш.

Заложен на второй надпойменной террасе р. Дудыпта. Поверхность выположена, с небольшим уклоном (0,5°) в сторону реки. Нанорельеф в виде пятен, приподнятых валиков и основной поверхности.

Растительность: пятнистая тундра – пятна песка, заросшие криптогамными корками, на валиках и основной поверхности – осоково-кустарничковая (*Dryas spp.*) моховая тундра.

Почва: подбур иллювиально-железистый (пятно) и подбур иллювиально-гумусовый (валики и трещины) (Ferric Arenosols + Humic Arenosols).

	Пятно		
	BF	0–32	Охристо-светло-серый песок. Влажный. Корней мало. Переход ясный, слегка волнистый.
	BC	32–73	Сизовато-серый песок с ржавыми разводами и пятнами. Корней нет. В верхней части встречаются пятна с мелкозёмом. Влажный. Переход ясный, плавный.
	C	73–106	Серая супесь, ржавые пятна и разводы. Мокрая. Корней нет. Переход ровный, резкий.
	C ₁	106	Та же супесь, мёрзлая. Мерзлота сухая.
	Валик		
	O	0–0,5	Тёмно-бурая подстилка. Свежая. Много корней. Переход ясный, резкий.
	ВН	0,5–22	До глубины 4–7 см тёмно-коричневый песок, к низу постепенно светлеет до охристо-коричневато-го. Влажный. Корней много. Нижняя граница волнистая, затёками. Переход ясный, неровный, затёками.
	BF	22–32	Охристо-светло-серый песок. Местами нижняя граница до 25 см глубины. Влажный. Корней меньше. Переход ясный, слегка волнистый.
	BC	32–73	Тот же, что и под пятном
	C	73–106	Тот же, что и под пятном
	C ₁	106	Тот же, что и под пятном

Разрез 18

92°40'41,80" в.д., 71°12'58,30" с.ш.

Разрез заложен на второй надпойменной террасе р. Дудыпта. Поверхность выположена, нанорельеф выражен в виде пятен, окаймлённых валиком.

Растительность: пятнистая дриадово-моховая тундра с пятнами накипных лишайников.

Почва: подбур иллювиально-гумусовый поверхностно-глеевый (пятно) и подбур иллювиально-гумусовый (валик) (Humic Epigleyic Arenosols + Humic Arenosols).

	Пятно		
	O	0–4	Слабоотторфованная подстилка с дернинами осок и дриады. Много корней. Мощность варьирует от 2 до 5 см. Свежая. Переход резкий, ровный.
	BF ₁	4–8	Охристо-коричневый лёгкий суглинок. Бесструктурный, липкий. Много корней. Мощность от 2 до 7 см. Переход резкий, неровный.
	G	8–16	Сизый суглинок. Корней мало. По верхней границе охристо-ржавая кайма, 0.5 см. По всей толще горизонта ржавые разводы. Переход ясный, неровный.
	BF ₂	16–30	Коричневый суглинок. Корней много. Мощность горизонта уменьшается в сторону центра пятна. Влажный. Бесструктурный. Переход ясный, плавный, неровный.
	BCg	30–50	Охристо-коричневатый лёгкий суглинок. Бесструктурный. Влажный. Корней мало. Местами неясные сизоватые пятна.
	Валик		
	O	0–6	Бурая подстилка с очёсом мхов, дернинами осок и дриады. Много корней. Свежая. Переход резкий, ровный.
	BHfg	6–20	Коричневый, местами – тёмно-коричневый лёгкий суглинок. Местами немного ржавых разводов, особенно по нижней границе. Много корней. Бесструктурный. В сторону пятна более светлый. Переход ясный, довольно резкий, неровный.
	BF	20–35	Охристо-коричневый суглинок, соответствует горизонту Bf (16 – 30) под пятном
	BCg	35–56	Соответствует горизонту BCg под пятном

Разрез 19

92°40'01,70" в.д., 71°13'01,60" с.ш.

Заложен на второй надпойменной террасе р. Дудыпта. Поверхность выположена с небольшим (не более 1°) уклоном в сторону реки. Нанорельеф не выражен.

Растительность: кустарничково-лишайниковая тундра.

Почва: криозём типичный поверхностно-глеевый (Haplic Epigleyic Cryosols).

	O	0–1	Очёс мхов. Слоевица лишайников, опад, дернины осок. Тёмно-бурая. Переход резкий, ровный.
	CRhi	1–11	Коричневый суглинок. Бесструктурный. Много корней. В верхней части более тёмный. Местами светло-коричневые пятна. Свежий. По нижней границе тёмные полосы. Переход ясный, ровный.
	CRg	11–24	Сизовато-серый суглинок. Местами, особенно в верхней части, ржавые разводы. Много корней. Местами нижняя граница поднимается до 19 см, местами опускается до 34 см. Переход ясный, волнистый.
	C	24–65	Охристо-серый песок. У верхней границы чёрные и тёмно-серые разводы. У нижней границы включения сизовато-серого суглинка. Корней мало. Чёрные пятна до глубины 40 см. Переход резкий.
	C ₁	65 и ниже	Тот же песок, мёрзлый. Мерзлота сухая.
			

Разрез 20

91°14'53,60" в.д., 70°56'43,90" с.ш.

Заложен на второй надпойменной террасе р. Кыстыхта, в 18 м от крутого склона к оврагу. Поверхность пологая, нанорельеф хорошо выражен в виде кочек пушицы.

Растительность: кочкарная пушицевая (*Eriophorum vaginatum*) лишайниково-зеленомошная тундра.

Почва: криозём глееватый грубогумусовый (Gleyic Cryosols Histic).

	Oao	0–10	Торф и оторфованная подстилка на бугорках. Между кочек торф мощностью до 12 см, под кочками уменьшается до 4 см. Дернины кочек до глубины 6 см. Много корней. Переход резкий, под кочками неясный.
	CRhi	10–15	Тёмно-коричневый суглинок. Влажный. Между кочек до глубины 17 см и дальше почти сразу мерзлота. Под кочками – до глубины 12 см. Переход ясный, местами затёками до 16 см. Много корней. Переход ясный.
	CRg	15–20	Сизоватый суглинок с охристыми разводами. Корней меньше. Под кочками до глубины 20 см, между кочек – до глубины 17 см, далее выклинивается. Местами коричневые пятна. Переход резкий.
	CRg±	20 и ниже	Тот же суглинок, мерзлый. Мерзлота жильная.

Разрез 21

91°14'55,60" в.д., 70°56'42,10" с.ш.

Заложен на второй надпойменной террасе р. Кыстыхта, в 30 м от крутого склона к оврагу. Поверхность вышоложена, нанорельеф выражен в виде пятен, окаймлённых валиком.

Растительность: пятнистая дриадово-моховая тундра с пятнами накипных лишайников.

Почва: подбур иллювиально-железистый (пятно) и подбур иллювиально-гумусовый (под растительностью) (Ferric Arenosols + Humic Arenosols).

	Пятно		
	BF	0–35	Охристо-серый песок. Нижняя граница очень неровная, от 20 до 30 см. В верхней части более тёмный, до глубины 16 – 18 см. Местами – включения сизовато-серого суглинка с ржавой каймой. Местами включает светло-серый песок, турбированный. Много крупных корней. Свежий. Переход ясный, очень неровный.
	BFg	35–65	Коричневый песок. Горизонт выражен фрагментарно. Корни. Свежий. Переход ясный, неровный.
	Cg	65–95	Тёмно-серый песок, слоистый. Влажный. Корней нет. Слои серого и сизовато-тёмно-серого песка.
	Валик		
	O	0–4	Бурая подстилка и дернина дриады, осок, пушицы, разнотравья, очёс мхов. Немного суглинка по всему профилю. В направлении пятна мощность уменьшается до 1 см. Много корней. Свежая. Переход ясный, волнистый.
	ВН	4–17	Коричневато-бурая супесь, местами тёмно-коричневая. В нижней части неясные ржавые разводы. Местами включения суглинка с творожистой структурой. Много мелких корней. Свежий. Глубина нижней границы варьирует от 5 до 20 см. Переход ясный, резкий, волнистый.
	BF	17–35	Тот же, что и под пятном
	BFg	35–65	Тот же, что и под пятном
	C	65–95	Тот же, что и под пятном

Разрез 22

91°15'34,00" в.д., 70°56'51,00" с.ш.

Разрез заложен на второй надпойменной террасе р. Кыстыхта, в 30 м от обрыва к реке. Поверхность выположена. Микрорельеф остаточно-полигональный.

Растительность: кустарничково-пушицевая моховая тундра.

Почва: торфяно-глеезём (Histic Gleysols).

	Под полигоном		
	О	0–2	Светло-бурая подстилка с корнями и дернинами. Сухая. Переход ровный, ясный.
	T ₁	2–7	Тёмно-коричневый торф. Очень много корней. Песок около 20%. Дернины осок. Свежая. Переход ясный, ровный.
	С	7–12	Тёмно-серая супесь. По нижней границе ржавые пятна и бурые разводы, местами светло-серый песок. Корней довольно много. Переход ясный, ровный.
	T ₂	12–28	Тёмно-коричневый, почти чёрный, хорошо разложившийся торф. Встречаются мелкие корни. В нижней части встречаются крупные остатки растений. Влажный. Переход резкий, ровный.
	T ₂₊	28 и ниже	Тот же торф, мёрзлый. Разложение меньше, окраска более светлая. Мерзлота льдистая.
	Под мочажинной		
	О	0–7	Бурый очёс сфагнов, дернины осок. Мокрый. Много корней. Переход ровный, ясный.
	T ₁	7–12	Тот же торф, что и под полигоном с песком, 5%.
	С	12–15	Та же супесь, что и под полигоном.
	T ₂	15–23	Светло-серый, хорошо разложившийся торф. Корней меньше. В морозобойной трещине тёмно бурая органика. В нижней части сочится вода. Переход резкий, ровный.
	T ₂₊	23	Тот же торф, мерзлый. Много крупных жил льда.

Разрез 23

91°15'04,10" в.д., 70°56'48,50" с.ш.

Разрез заложен на второй надпойменной террасе р. Кыстыхта, в 80 м от пологого склона к оврагу и в 140 м от высокого обрыва к реке. Поверхность пологая, нанорельеф выражен в виде редких кочек пушицы.

Растительность: пушицево-кустарничковая лишайниково-моховая тундра.

Почва: криозём глееватый (Gleyic Cryosols).

	Под кочкой		
	O	0–6	Бурый очёс мхов, в нижней части оторфован, тёмно-бурый. Много корней и дернин осок. Свежий. Переход ясный, ровный.
	CRg	6–30	Сизовато-серый суглинок, липкий. Бесструктурный. Ржавые разводы, местами, ближе к мочажине – прослойки тёмно-коричневого суглинка с остатками органики. Много мелких корней. Влажный. Переход условный, плавный.
	Sg	30–60	Охристо-серый суглинок. Со стороны мочажины тёмно-коричневые пятна. Неясно-плитчатый (пластинки на разломе), особенно в нижней части. Не очень липкий. Корни мелкие, очень мало. Переход ясный, резкий.
	Sg±	60	Тот же суглинок, мёрзлый. Ближе к мочажине более льдистый.
	Под основной поверхностью		
	O	0–9	Тот же бурый очёс
	CRhif	9–16	Тёмно-коричневый суглинок. Очень много мелких корней. Бесструктурный. Мокрый. Книзу светлеет и довольно резко переходит в нижний горизонт. В сторону кочки быстро выклинивается.
	CRg	16–26	Тот же суглинок, больше ржавых разводов и охристых пятен.
	Sg	26–47	Тот же суглинок, коричневатосерый.
	Sg±	47	Тот же суглинок, мёрзлый.

Разрез 24

91°15'04,00" в.д.70°56'41,60" с.ш.

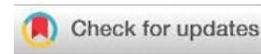
Разрез заложен в тыловой части поймы в устьевой части старицы р. Кыстыхта. Поверхность наклонная, 5° в сторону русла. В 10 м от разреза – крутой склон (обрыв) второй надпойменной террасы. У основания склона – небольшие конусы выноса галечно-валунного материала надпойменной террасы.

Растительность: заросли ольховника злаково- и осоково-разнотравные.

Почва: аллювиальная серогумусовая (Humic Fluvisols).

	О	0–0,5	Очёс мхов и опад, в основном ольхи, местами подстилки нет. Переход ровный, ясный.
	АУhi	0,5–16	Тёмно-коричневый суглинок. Комковатый. Очень много корней. Остатки органики. Свежий. В верхней части до 7 см почти дерновый горизонт. Книзу появляются прослойки песка. В горизонте много материала со склона, ниже – речной аллювий. Переход ровный, ясный.
	С ₁ ~	16–46	Слоистый светло-серый аллювиальный песок с прослойками суглинка и супеси тёмно-серого цвета. Много корней. Свежий. Переход ясный, резкий.
	С ₂ ~	46–50	Песок с галькой, до 10 см, слабо окатанной, 60%. Свежий. Переход ясный, ровный.
	С ₃ ~	50–70 и ниже	Слоистый песчаный аллювий с прослойками тёмно-серого и коричневого суглинка. По песку местами ржавые разводы. Свежий.
			

УДК 630.114.444:577.152.1:631.417 (571.1)

<https://doi.org/10.31251/pos.v7i2.256>

Сезонная активность анаэробной дегидрогеназы торфяных почв в связи с химическими факторами окислительно-восстановительной среды осушенных лесных болот

© 2024 Т. Т. Ефремова , С. П. Ефремов , А. Ф. Аврова 

Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН – обособленное подразделение ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр СО РАН», Академгородок, д. 50, стр. 28, г. Красноярск, 660036, Россия. E-mail: efr2@ksc.krasn.ru

Цель исследования. Изучить специфику сезонных колебаний анаэробной дегидрогеназы торфяных почв под воздействием гидроресомелиорации – мощного экзогенного фактора, влияющего на скорость и направленность биохимических процессов.

Место и время проведения. Зона южной тайги Западной Сибири (56°23'07" с.ш., 84°34'04" в.д.) в течение июня–октября 2001–2003 гг.

Методы. Исследование сезонной динамики активности анаэробной дегидрогеназы и химических компонентов почвенной среды – С, NH₄⁺, Fe²⁺, Fe³⁺, Fe_c (связанное с органическим веществом) выполнено с применением метода системно-экологического анализа.

Основные результаты. Профиль осушенных лесных почв четко дифференцирован на три зоны активности анаэробной дегидрогеназы: 0–5 см – высокой, 5–10 см – умеренно активной, 10–30 см – относительно пассивной. Основная тенденция (тренд) развития сезонных колебаний активности дегидрогеназы с июня по октябрь аппроксимируется параболой второго порядка. Согласно параметрам уравнений тренда, в слабо осушенных почвах еженедельное увеличение активности дегидрогеназы составляло в среднем 0,205 единиц с еженедельным средним замедлением 0,022. В режиме интенсивного осушения еженедельное замедление в среднем на 0,131 с еженедельным средним ускорением на 0,022 единиц. Повышение активности анаэробной дегидрогеназы выявлено в почвенных горизонтах 0–5 см, при этом наибольшие темпы выявлены в режиме слабого осушения. Вниз по профилю в течение всего периода наблюдений. Выявлена умеренно сильная взаимосвязь активности анаэробной дегидрогеназы, подвижных форм железа, водорастворимого органического вещества и аммония. Кумулятивная доля объясненной дисперсии активности дегидрогеназы подвижными формами железа (Fe²⁺, Fe³⁺, Fe_c) в слабо и интенсивно осушенных почвах составила 61 и 41%, а биогенными элементами (органическое вещество и NH₄⁺) – 25 и 44%, соответственно.

Заключение. Химические компоненты водной вытяжки являются важными экологическими факторами, контролирующими динамику ферментативных реакций торфяных почв. Доминантными факторами сезонных колебаний фермента независимо от режима осушения являются железо-органические комплексы и аммоний, а также окисленное железо в режиме слабой гидромелиорации, а в режиме глубокой – восстановленное железо.

Ключевые слова: тренд сезонных колебаний; темпы прироста (снижения); подвижные формы железа; водорастворимое органическое вещество; аммоний; совокупный вклад; регрессионные модели; канонический анализ.

Цитирование: Ефремова Т.Т., Ефремов С.П., Аврова А.Ф. Сезонная активность анаэробной дегидрогеназы торфяных почв в связи с химическими факторами окислительно-восстановительной среды осушенных лесных болот // Почвы и окружающая среда. 2024. Том 7. № 2. e256. DOI: [10.31251/pos.v7i2.256](https://doi.org/10.31251/pos.v7i2.256).

ВВЕДЕНИЕ

Основной почвообразовательный процесс разложения и синтеза органического вещества неизменно связан с действием почвенного энзиматического комплекса, который выполняет функции катализатора биогеохимических процессов, обеспечивает взаимодействие экологических факторов и характеризует качественное состояние почв (Купревич, Щербакова, 1966; Хазиев, 1982; Allison, 2006; Makoi, Mdakidemi, 2008; Karaca et al., 2010). Оценка функционального разнообразия почвенных ферментов, обусловленная различными условиями почвенной среды, улучшит понимание связи биохимической трансформации органического вещества с экосистемными процессами. Однако высокая пространственно-временная изменчивость ферментов создает большие проблемы для понимания того, как химические, физические и биологические свойства почвы влияют на природу её биокаталитической способности (Хазиев, 2018; Caldwell, 2005; Sinsabaugh, 2010; Burns et al., 2013). Отсюда вытекает необходимость применения системно-экологического подхода – метода «анализа ... на основе функциональной взаимосвязи и взаимодействия с экологическими параметрами в их

пространственно-временном проявлении» – методами математической статистики (Хазиев, 1982, с. 20).

Большую роль в превращении органических соединений ароматического ряда играют окислительно-восстановительные ферменты. В результате окисления полифенолов образуются хиноны, которые при конденсации с аминокислотами и пептидами образуют первичную молекулу гуминовой кислоты. При этом хиноны могут снова восстанавливаться до полифенолов за счет реакций отщепления водорода, активированного анаэробной дегидрогеназой, вновь акцептировать кислород при участии фенолоксидаз и опять восстанавливаться (Кононова, 1963; Рубин, 1971). Поэтому важно изучать не только реакции, идущие с присоединением кислорода, но и реакции с отнятием водорода, чтобы полнее охарактеризовать почву как единую систему биохимических процессов. Установлено, что накопление почвенной дегидрогеназы обусловлено микробной биомассой, а функционирование, зависящее от свойств почв, служит наиболее чувствительным показателем общей микробиологической активности в ходе естественной эволюции, а также антропогенных воздействий (Купревич, Щербакова, 1966; Галиулин и др., 2014; Хазиев, 2018; Schaefer, 1963; Brzezińska et al., 2001; Borowic et al., 2014). Вместе с тем, дегидрогеназы (прежде всего, торфяных почв) относятся к числу самых неизученных ферментов класса оксидоредуктаз. В настоящее время есть данные об активности фермента в торфяных почвах Белорусского Полесья, лесных торфяных почвах междуречья Оби и Томи, торфах Западной Сибири – фрагментарно (Ефремова и др., 2006; Ефремова, Овчинникова, 2007; Лучинок и др., 2013; Инишева, 2020). Изучение сезонной активности анаэробной дегидрогеназы и особенностей её распределения по профилю почв позволяет оценить внутренние биохимические процессы и глубину преобразования торфяных почв, создавая научную основу оптимизации освоения и повышения лесорастительного потенциала осушенных болот.

Целью работы – изучить специфику сезонных колебаний анаэробной дегидрогеназы торфяных почв под воздействием гидроресомелиорации – мощного экзогенного фактора, влияющего на скорость и направленность биохимических процессов.

Решали следующие задачи:

- установить особенности формирования пространственно-временной динамики активности анаэробной дегидрогеназы торфяных почв разной глубины осушения;
- охарактеризовать аналитические показатели рядов сезонной динамики фермента;
- оценить функциональную связь активности оксидоредуктазы с химическими свойствами почв, характеризующими окислительно-восстановительную обстановку в почве;
- выявить результат совокупного воздействия изучаемых факторов среды;
- установить доминантные факторы, контролирующие динамику активности дегидрогеназы.

Исследования подобного направления в лесных торфяных почвах южной тайги Западной Сибири выполнены впервые.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В зоне южной тайги Западной Сибири изучали мезотрофное болото Еловочное, осушенное 25 лет назад (от момента исследования) сетью мелких открытых каналов с целью лесовыращивания (географические координаты: 56°23'07" с.ш., 84°34'04" в.д.). Занято сосновыми древостоями (*Pinus sylvestris* L.) естественного происхождения. В пространстве осушительной сети объектом исследования выбран сосняк осоково-сфагновый, расположенный на межканальной полосе 93 м и разнотравно-мятликовый – на стыке магистрального и ловчего каналов. Участки характеризуют условия слабого и интенсивно осушения торфяных почв (Histosols), глубина стояния почвенно-грунтовых вод за три года наблюдений составила в среднем 23,2±9,9 и 70,2±16,0 см соответственно. Разграничение участков обосновано методами многомерного статистического анализа (Ефремова и др., 2006; Ефремова, Овчинникова, 2007).

Торфяные почвы – освоенные переходного (мезотрофного) типа на мощных осоково-сфагновых торфах, по классификации (Скрынникова, 1964; Пьявченко, 1978; Ефремова, 1992). Современные почвообразовательные процессы протекают, как принято считать, преимущественно в верхних 30 см торфяной залежи, залегающих выше средневегетационного уровня стояния верховодки – зоны сосредоточения корней растений, микроорганизмов и почвенных беспозвоночных. Почвы морфологически слабо дифференцированы на горизонты 0–5, 5–10, 10–20, 20–30 см преимущественно по степени загруженности сосущими корнями, слабо – по цвету и плотности. В течение периода наблюдений (июнь–октябрь) преобладали окислительные условия среды (рис 1 А). Горизонты слабо осушенных почв в 2–3 раза влажнее, холоднее примерно на 2°C, а величина pH в грациях кислот

среды несколько ниже относительно интенсивно осушенных (рис 1 Б, В, Г). Зольность торфяного субстрата снижается по профилю залежи и составляет в режиме слабого осушения – 8,9–5,2%, интенсивного – 15,6–6,9%, то есть слабо возрастает со степенью гидромелиорации. Более наглядно в связи с режимом осушения изменяется степень гумификации органического вещества ($\Sigma\Gamma\text{К}+\Sigma\text{ФК}$). В почвах слабого осушения она падает с глубиной и равняется 59,1–36,9%, в режиме интенсивного осушения – слабо варьирует в пределах почвенного профиля и составляет 73,4–69,8%. Соответственно, показатели $\text{C}_{\text{гк}} / \text{C}_{\text{фк}}$ расширяются с 0,90–1,20 до 1,3–1,5, сужается отношение C/N с 21,4–13,5 до 16,6–26,7. В корненасыщенном слое (0–20 см) возрастают запасы гумуса до 96,8 против 48,9 т/га, то есть почти в 2 раза.

Сезонную активность анаэробной дегидрогеназы изучали с июня по октябрь с шагом 5–8 дней (в среднем неделя). Активность фермента определяли методом А.Ш. Галстяна в естественно-влажных образцах (без добавления глюкозы) при разрежении 10–12 мм рт. ст. продолжительностью 2–3 минуты и последующем компостировании в термостате при 30°C в течение суток (Хазиев, 2005). Активность дегидрогеназы выражали в мг формазана на 1 г абсолютно сухой навески за 24 часа. В сезонной динамике одновременно изучали компоненты водной вытяжки, определяющие, наряду с оксидоредуктазами, развитие окислительно-восстановительных процессов в почвенной среде – органическое вещество, выраженное в углероде ($\text{C}_{\text{орг}}$); аммоний (NH_4^+); двух- и трехвалентное железо (Fe^{2+} и Fe^{3+}), а также железо, связанное с органическим веществом (Fe_c). Ингредиенты определяли в свежееотобранных образцах: Fe^{2+} с $\alpha\alpha$ -дипиридиллом; Fe^{3+} и Fe_c (после озоления водной вытяжки) – сульфосалициловой кислотой; $\text{C}_{\text{орг}}$ – бихроматным методом по Тюрину; NH_4^+ – с реактивом Несслера (Агрохимические ..., 1975).

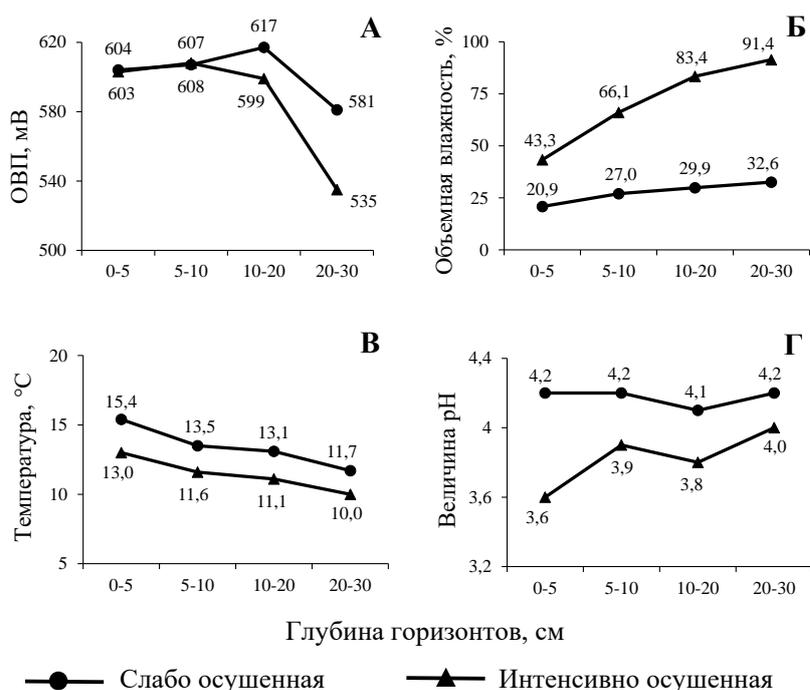


Рисунок 1. Водно-физико-химические показатели современных торфяных почв (0–30 см) разной степени осушения (среднее за период наблюдений – июнь–октябрь).

Условные обозначения: А – окислительно-восстановительный потенциал, мВ; Б – объемная влажность, %; В – температура почв, °C; Г – показатели pH.

Статистическую характеристику сезонной активности дегидрогеназы выполняли согласно (Чекотовский, 2002; Халафян, 2007). Применили систему абсолютных и относительных аналитических показателей, позволяющих выявить и определить характер, направление и интенсивность изменений временных рядов – метод наименьших квадратов, темпы роста (индекс сезонности) и темпы прироста, которые определяются как процентные отношения фактических уровней временного ряда u_i к некоторой базе сравнения u_t . В качестве таковой приняли среднюю арифметическую взвешенную за весь период наблюдений в слое 0–30 см соответствующих почв (табл. 1). Индекс сезонности: $I_s = u_i/u_t \times 100\%$ показывает, какую часть временного среднего он составляет (табл. 2). При этом влияние

основной тенденции развития временного ряда (тренда) устраняется (Чекотовский, 2002). На основе темпов роста T (индекса сезонности) рассчитали темпы прироста (ТП) активности дегидрогеназы: $ТП, \% = (T-100)$. Темп прироста показывает, на какой процент уровень данного срока наблюдений больше или меньше базисного уровня. Положительное значение прироста означает увеличение, отрицательное – уменьшение.

При обсуждении анаэробной активности дегидрогеназы использованы принципы системно-экологического анализа ферментативной активности почв (Хазиев, 1982).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Общая характеристика активности анаэробной дегидрогеназы. Колебания ферментативной активности почв происходят на определенном фоне. В современных торфяных почвах (0–30 см) средневзвешенный потенциал дегидрогеназы за период наблюдений (июнь–октябрь) составил 0,71 и 0,83 мг формазана на 1 г абсолютно сухой навески за 24 часа (табл. 1).

Таблица 1

Статистические показатели активности дегидрогеназы в лесных торфяных почвах разной глубины осушения за июнь–октябрь

Статистические показатели	Глубина почвенных горизонтов, см				
	0–5	5–10	10–20	20–30	0–30
Слабо осушенные торфяные почвы					
Средневзвешенное	2,02	0,46	0,15	0,22	0,71
Медиана	1,96	0,35	0,11	0,19	0,69
Минимум-максимум	0,35–4,78	0–1,91	0–0,46	0–0,62	0,23–1,47
Коэффициент вариации, %	55	101	82	81	51
Интенсивно осушенные торфяные почвы					
Средневзвешенное	1,99	0,65	0,39	0,27	0,83
Медиана	1,61	0,61	0,67	0,33	0,62
Минимум-максимум	0,09–4,36	0,12–1,55	0,13–0,94	0,08–0,56	0,13–1,76
Коэффициент вариации, %	69	65	66	55	59

По активности дегидрогеназы профиль почв четко дифференцирован на три зоны: интенсивную 0–5 см, умеренно активную 5–10 см и относительно пассивную 10–30 см. По мере заглубления каждой зоны потенциал дегидрогеназы заметно снижался. Выраженная дифференциация почвенного профиля обусловлена, вероятнее всего, ризосферным эффектом – максимальной активностью микроорганизмов в прикорневой зоне. В осушенных сосняках физиологически активные корни в горизонте 0–4 см составляют 58%, 4–8 см – 33, 8–30 см – 4% к массе корней в слое 0–30 см (Ефремов, Ефремова, 1973). Общее количество микроорганизмов в верхнем горизонте достигает многие миллионы, снижается с глубиной и подвержено сезонным колебаниям; наиболее распространенную группу в болотах переходного (мезотрофного) типа составляют неспорозисные бактерии с преобладанием флюоресцирующих и плесневых грибов – пенициллы и муконовые (Козловская и др., 1978). О резком уменьшении с глубиной микробной биомассы и ферментативной активности в лесных почвах писали и другие авторы (Baldrian, Štursová, 2010).

Детерминированный компонент изменения уровня сезонной активности. Важной характеристикой при статистическом изучении интенсивности сезонных колебаний является установление основной тенденции развития (тренда) временных рядов. Наиболее простой и удобный способ отображения основной тенденции – графоаналитические построения. Однако конфигурация статистической кривой линейной диаграммы сезонной активности дегидрогеназы все время меняется, что затрудняет оценку (рис. 2). Поэтому применили математическую функцию – уравнение тренда, на основе которой вычисляли выровненные, теоретические уровни фактических данных. Достоверность аппроксимации оценивали коэффициентом детерминации R^2 , F -критерием и p -уровнем значимости. Выбранный тип математической функции принимали в качестве количественной модели. Степень надежности выбранного трендового уравнения – параболы второго порядка, характеризующего закономерности развития активности дегидрогеназы во времени – была наиболее высокой в режиме интенсивного осушения ($R^2 = 0,80$, рис. 2). В слабо осушенных почвах оставалась статистически значимой ($R^2 = 0,47$). В параболической функции тренда положительный знак параметра b_1 и отрицательный параметра b_2 показывает, что выровненные уровни временного ряда увеличиваются с замедлением, равным $2b_2$ (Чекотовский, 2002). Согласно параметрам регрессионных уравнений, в слабо осушенных почвах еженедельное увеличение активности дегидрогеназы составляло в среднем

0,205 единиц с еженедельным средним замедлением 0,022 с июня по октябрь. В режиме интенсивного осушения параболический тренд отражает еженедельное замедление уровней временного ряда в среднем на 0,131 с еженедельным средним ускорением на 0,022 единиц. Противоположная направленность развития ферментативных процессов, возможно, связана с большими изменениями в соотношении отдельных групп микроорганизмов, растущих на МПА в условиях повышенной воздухоемкости почв (Загуральская, 1967). В интенсивно осушенных – 76% против 25% в режиме слабо осушенных. Вместе с тем, уравнения тренда отражают по сути лишь основную тенденцию развития потенциала дегидрогеназы и прямого отношения к динамике сезонной активности во времени не имеют (Чекотовский, 2002).

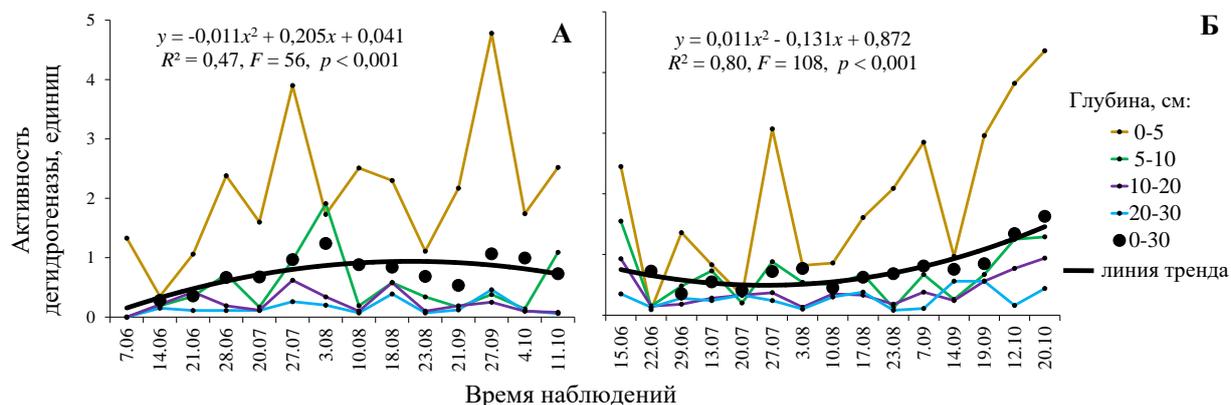


Рисунок 2. Динамика активности анаэробной дегидрогеназы в горизонтах осушенных торфяных почв и основная тенденция (тренд) развития сезонных колебаний в пределах профиля 0–30 см за июнь–октябрь. Степень осушения: А – слабая, Б – интенсивная.

Сезонные колебания. При статистическом изучении сезонного варьирования процессов необходимы данные о внутрисезонных периодах, влияющих на величину уровня динамики: в случае недельного интервала наблюдений период сезонных колебаний равняется месяцу (Чекотовский, 2002). Упорядоченные по месяцам средневзвешенные временные ряды активности дегидрогеназы представлены в табл. 2.

Таблица 2

Статистическая группировка сезонной активности дегидрогеназы горизонтов торфяных почв и темпы роста по месяцам за период наблюдений

Месяц	0–5 см		5–10 см		10–20 см		20–30 см		0–30 см	
	Ед.	Т, %	Ед.	Т, %	Ед.	Т, %	Ед.	Т, %	Ед.	Т, %
Слабо осушенные торфяные почвы, средневзвешенная активность дегидрогеназы слоя 0–30 см – 0,71 ед.										
Июнь	1,28	180	0,32	44	0,09	13	0,21	29	0,47	66
Июль	2,75	387	0,56	79	0,19	26	0,37	52	0,97	137
Август	1,91	269	0,76	106	0,18	26	0,28	39	0,78	110
Сентябрь	3,48	489	0,27	39	0,29	41	0,22	31	1,06	149
Октябрь	2,13	300	0,61	86	0,08	12	0,09	13	0,73	103
Интенсивно осушенные торфяные почвы, средневзвешенная активность дегидрогеназы слоя 0–30 см – 0,83 ед.										
Июнь	1,30	157	0,73	88	0,42	51	0,253	31	0,68	82
Июль	1,41	170	0,60	73	0,33	39	0,27	33	0,65	78
Август	1,35	162	0,46	55	0,25	30	0,22	26	0,57	69
Сентябрь	2,26	272	0,53	64	0,39	47	0,41	49	0,90	108
Октябрь	4,09	493	1,27	153	0,86	103	0,30	36	1,63	196

Примечание.

Ед. – единицы измерения, мг формазана на 1 г почвы за 24 часа; Т – темпы роста активности дегидрогеназы относительно средневзвешенной за период наблюдений, %.

Современные торфяные почвы 0–30 см в целом явно различались ходом сезонных колебаний активности дегидрогеназы (рис. 3 А, Б). Общим явилось лишь июньское снижение темпов прироста вследствие, вероятно, качественного состава микрофлоры. Показано, что в раннелетний период

торфяные почвы обсуждаемого болотного массива характеризуются высокой численностью флюоресцирующих неспоронных бактерий, в середине лета, когда почвы максимально прогреваются, резко возрастает количество активных споронных микроорганизмов, обладающих более мощным ферментативным аппаратом (Загуральская, 1967). Косвенным подтверждением служит последующий положительный темп прироста активности анаэробной дегидрогеназы слабо осушенных почв. Интенсивно осушенные почвы в течение лета характеризовались низкой объемной влажностью и высокой порозностью аэрации (см. рис. 1 Б). Иссушение почв, по всей видимости, вызвало падение активности микрофлоры, которое сопровождалось отрицательным приростом анаэробной дегидрогеназы. Осенние дожди в октябре оживили биохимическую активность этих почв и резко снизили темпы прироста в условиях слабого осушения.

В профиле почв выделились три зоны темпов прироста активности дегидрогеназы: 0–5 см – положительных, 10–30 см – отрицательных и 5–10 см – специфических, обусловленных глубиной осушения. В зоне положительных темпов прироста наиболее высокие показатели пришлись на июль и сентябрь в почвах слабого осушения (+290, +390%), в режиме интенсивного – на октябрь (+400%). В зоне 5–10 см слабо осушенных почв на фоне падения активности дегидрогеназы проявился августовский слабый темп прироста (+6) и достаточно выраженный октябрьский (+53%) в интенсивно осушенных. В зоне преимущественно отрицательных темпов прироста максимальное снижение активности дегидрогеназы установлено: слабо осушенные почвы – июнь и октябрь (–88%) на глубине 10–20 см, интенсивно осушенные – август (–74%) в слое 20–30 см.

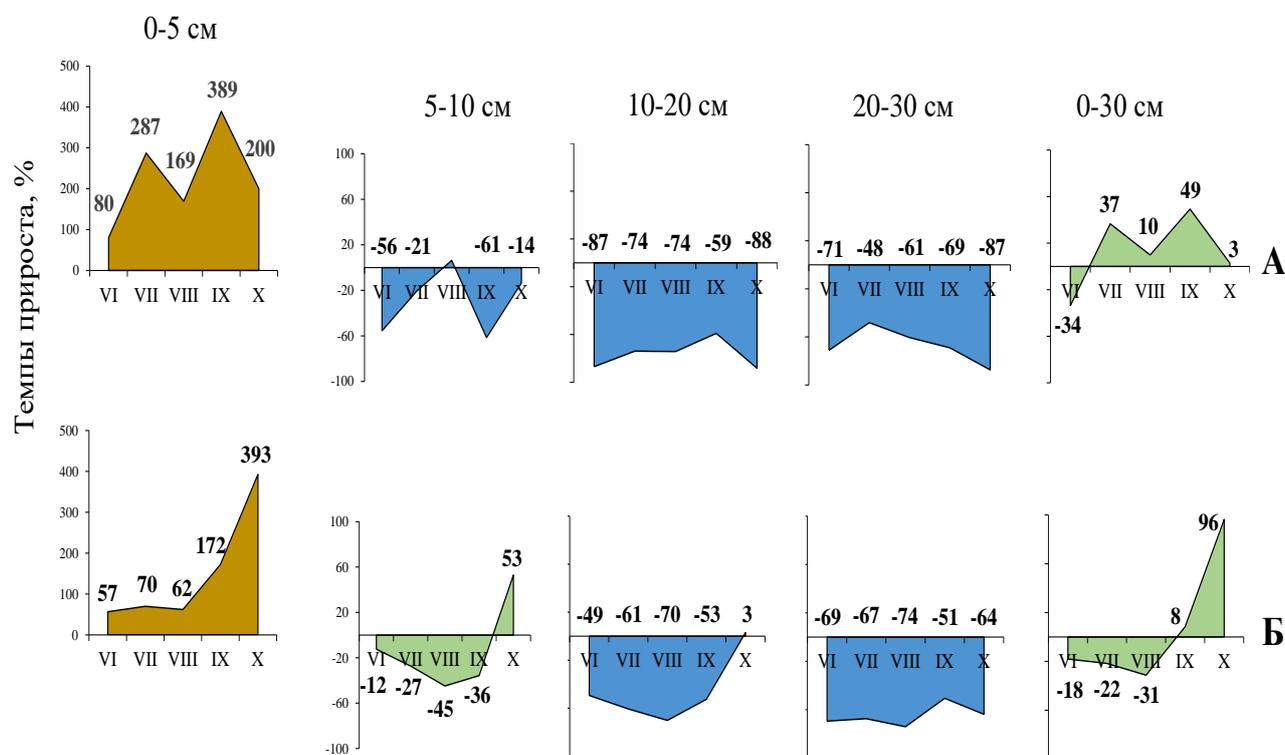


Рисунок 3. Темпы прироста (снижения) сезонной активности дегидрогеназы в горизонтах осушенных почв за период наблюдений. Индексы А, Б – см. рис. 2.

Экологическая обусловленность сезонной активности дегидрогеназы. Химический состав почв является важнейшим экологическим фактором, контролирующим ферментативную активность почв, наравне с физико-химическими свойствами и гидротермическим режимом (предмет отдельного обсуждения). Химический состав водной вытяжки осушенных торфяных почв (0–30 см) за теплый период приведен в табл. 3. Железо в почвах присутствует в двух состояниях Fe^{2+} , Fe^{3+} , а также в форме соединений с органическим веществом (Кауричев, Орлов, 1982). В слабо осушенных почвах по сравнению с интенсивно осушенными восстановленное железо и водорастворимое органическое вещество выше в 1,6 и 1,8 раза соответственно. В режиме глубокой гидромелиорации почв преобладает железо, связанное с органическим веществом (Fe_C), и водорастворимый аммоний (NH_4^+); в 1,5 и 2 раза, соответственно (табл. 3.).

Таблица 3

Среднее содержание подвижных форм железа и биогенных компонентов в лесных торфяных почвах (0–30 см) за летний период, мг/100 г

Градации осушения почв	Подвижные формы железа			Биогенные компоненты	
	Fe ²⁺	Fe ³⁺	Fe _c	C _{орг}	NH ₄ ⁺
Слабо осушенные	0,72	0,35	0,97	200	5,7
Интенсивно осушенные	0,45	0,45	1,47	109	10,8

Примечание.

Здесь и далее в табл. 4: Fe_c – железо, связанное с органическим веществом; C_{орг} – органическое вещество, выраженное в углеводе.

Связь анаэробной дегидрогеназы и восстановленного железа в режиме слабого и интенсивного осушения аппроксимируется полиномом второго порядка в пределах содержания Fe²⁺ – 0,27–1,47 и 0,3–0,65 мг/100 г, соответственно (рис. 4 Аа, Ба). Независимо от глубины осушения почв количество окисленного железа Fe³⁺ (0,07–0,75 мг/100 г) и активность дегидрогеназы связаны функцией параболы средней тесноты (рис. 4 Аб, Бб). Экстремумы (точки перегиба) двух- и трехвалентного железа 0,4–0,5 мг/100 г, рассчитанные на основании параметров регрессионных уравнений, показывают, что превышение данной величины изменяет отрицательное направление связи на положительное. Взаимосвязь активности дегидрогеназы и содержания железа, связанного с органическим веществом, в условиях слабого осушения (Fe_c 0,42–1,63 мг/100 г) и интенсивного (Fe_c 0,69–2,53 мг/100 г) аппроксимируется параболической функцией средней и высокой тесноты (рис. 4 Ав, Бв). Экстремумы 1,1 и 1,8 мг/100 г, соответственно, отражают падение активности дегидрогеназы при снижении количества железа и подъем активности в случае повышения данной величины.

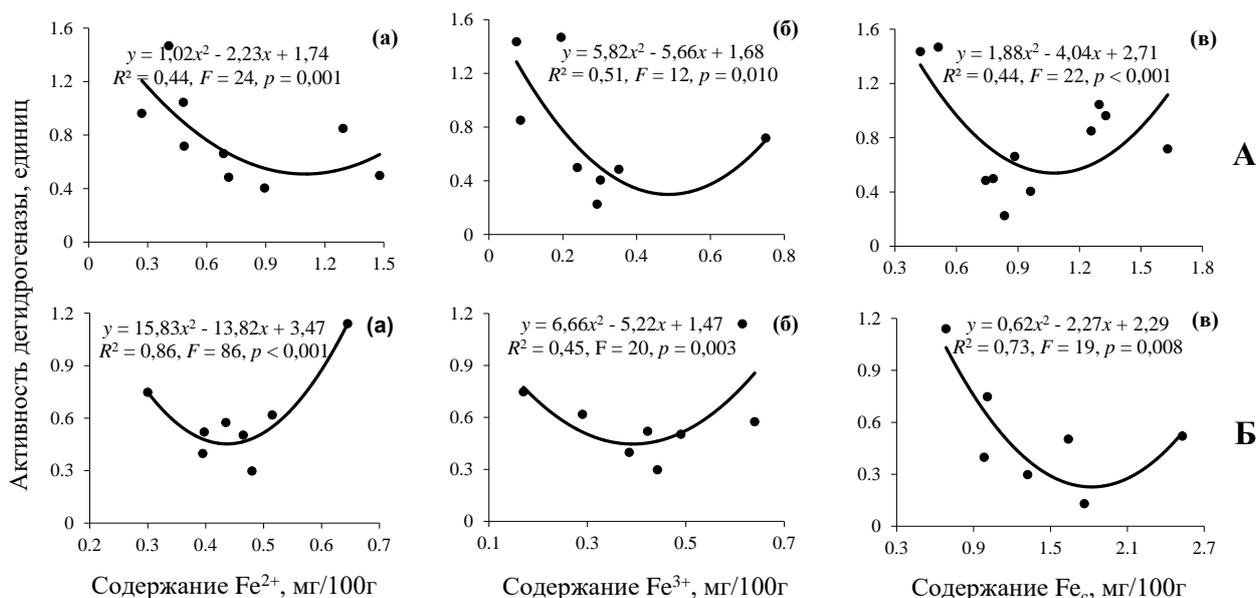


Рисунок 4. Регрессионная связь сезонной активности почвенной дегидрогеназы и подвижного железа: (а) – восстановленного; (б) – окисленного; (в) – связанного с водорастворимым органическим веществом. Индексы А, Б – см. рис. 2.

Различные группы почвенных ферментов, в том числе оксидоредуктаз, участвуют в биогеохимических циклах превращения углерода и азота. В составе водорастворимого органического вещества доминируют гумусовые компоненты фульватной природы (Ефремова и др., 1998). Активность дегидрогеназы и количество органического вещества описывается полиномиальной функцией (рис. 5 Аа, Ба). Нисходящие ветви параболы характеризуют отрицательную связь при содержании углерода 87–149 в режиме глубокого осушения и 130–254 мг/100 г – слабого. Экстремум 240 мг/100 показывает, что выше предсказанного значения отрицательное направление связи сменяется положительным.

Аммиак образуется в почве в качестве промежуточного продукта в процессе метаболизма азота с участием оксидоредуктаз. Динамика потенциала дегидрогеназы и содержание водорастворимого

аммония тесно отрицательно связаны полиномом второго порядка в интервале NH_4^+ от 2,4 до 16,2 мг/100 г (рис. 5 Аб, Бб) с точкой перегиба около 13 мг/100 г.

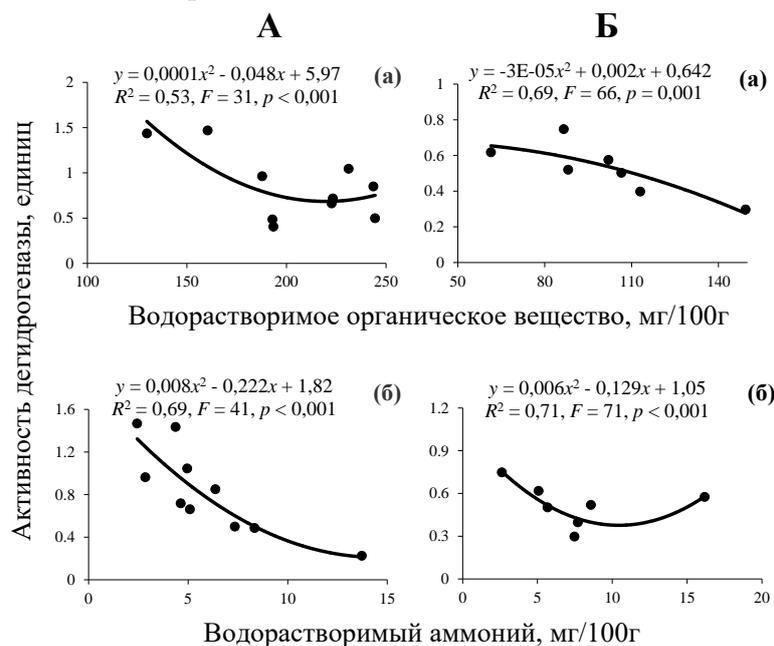


Рисунок 5. Регрессионная связь активности дегидрогеназы и водорастворимых биогенных компонентов: (а) – органическое вещество; (б) – аммоний. Индексы А, Б – см. рис. 2.

Канонический анализ. Результаты отдельного, изолированного влияния показателей почвенной среды требуют, согласно методологии системно-экологического анализа, последующего обобщения, а именно оценки совокупного эффекта и установления доминантных факторов, контролирующих в данном случае активность анаэробной дегидрогеназы осушенных торфяных почв. С этой целью применили канонический анализ. Метод является обобщением множественной корреляции как мера связи одной случайной величины и множеством других случайных величин. Рассмотрели два блока факторов среды в отдельности: биогенные компоненты (органическое вещество, аммоний) и различные формы подвижного железа. Дискриминирующая возможность выделенных корней (доля собственного значения корня от суммы всех собственных значений), согласно индексам канонической детерминации, показывает, что кумулятивная доля объясненной дисперсии активности дегидрогеназы подвижными формами железа составила 61% и 41% в режиме слабого и интенсивного осушения, соответственно (табл. 4).

Таблица 4

Результаты канонического анализа связи сезонной активности анаэробной дегидрогеназы с подвижными формами железа и биогенными компонентами осушенных лесных почв

Переменные	Слабо осушенная почва		Интенсивно осушенная почва	
	Стандартизованные коэффициенты	Факторная структура	Стандартизованные коэффициенты	Факторная структура
Подвижные формы железа:				
Fe^{2+}	-0,33	0,18	-0,89	-0,85
Fe^{3+}	-0,87	-0,81	0,33	-0,14
Fe_c	-0,44	-0,80	0,38	0,73
Оценка корня: $R^2 = 0,61$, χ -критерий – 5,16, p -уровень – 0,016		Оценка корня: $R^2 = 0,41$, χ -критерий – 2,34, p -уровень – 0,051		
Биогенные компоненты:				
NH_4^+	0,93	0,87	0,92	0,91
$\text{C}_{орг}$	-0,49	-0,38	-0,42	-0,39
Оценка корня: $R^2 = 0,25$, χ -критерий – 1,69, p -уровень – 0,043		Оценка корня: $R^2 = 0,44$, χ -критерий – 2,89, p -уровень – 0,024		

Примечание.

Жирным выделены канонические коэффициенты, соответствующие наибольшему вкладу переменной.

Стандартизованные коэффициенты, то есть абсолютные значения «веса», соответствуют уникальному вкладу, вносимому соответствующей переменной во взвешенную сумму или каноническую переменную (корень). Наибольший вклад в совокупный эффект различных форм железа вносят катионы восстановленного железа в интенсивно осушенных почвах и окисленного железа – в слабо осушенных. Так как на расчет стандартизованных коэффициентов оказывает влияние взаимная корреляция переменных, вклад одного из показателей может частично погашаться вкладом другого, снижая абсолютные значения коэффициента. Поэтому полную корреляцию между соответствующей переменной и взвешенной суммой (корнем) отражают нагрузки коэффициентов факторной структуры, которые интерпретируются подобно коэффициентам корреляции, чем выше значение (по модулю), тем теснее связь. При этом знак не имеет существенного значения для оценки значимости связи между переменной и дискриминантной функцией, различные знаки просто показывают, что переменные связаны с корнем в противоположном направлении (Боровиков В., Боровиков И., 1997). Коэффициенты факторной структуры ($r = 0,73-0,85$) показывают, что с корнем, наряду с ионами Fe^{2+} и Fe^{3+} , тесно связаны железо-органические (гумусовые) комплексы. То есть все формы железа, присутствующие в почвах, оказывают управляющее воздействие на процессы сезонной активности анаэробной дегидрогеназы.

Совокупность водорастворимых биогенных компонентов – органическое вещество ($C_{орг}$) и аммоний (NH_4^+), судя по каноническим индексам детерминации, совокупно объясняют активность дегидрогеназы почв на 25% в условиях слабой гидромелиорации и 44% – интенсивной. Стандартизованные коэффициенты и факторные нагрузки ($r = 0,87-0,93$) свидетельствуют о том, что аммоний – доминантный фактор, контролирующий активность фермента.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Профиль осушенных торфяных почв в связи с потенциалом анаэробной дегидрогеназы четко дифференцирован на три зоны: высоко активную 0–5 см, умеренно активную 5–10 см и относительно пассивную 10–30 см. Средневзвешенный потенциал слоя 0–30 см современной торфяной почвы (базовый уровень) за период июнь–октябрь составил в режиме слабой гидромелиорации 0,71, интенсивной – 0,83 мг формазана на 1 г абс. сух. навески за 24 часа соответственно.

Основной ход развития (тренд) сезонных колебаний активности дегидрогеназы наиболее адекватно аппроксимируется функцией параболы второго порядка. Параметры трендового уравнения показывают: в слабо осушенных почвах активность дегидрогеназы еженедельно ускорялась в среднем на 0,205 единиц с еженедельным средним замедлением на 0,022 единиц, в режиме интенсивного – еженедельно замедлялась в среднем на 0,131 с еженедельным средним ускорением на 0,022 единицы.

Толща 0–30 см в целом осушенных торфяных почв характеризовалась июньскими отрицательными темпами прироста активности дегидрогеназы. Положительный прирост весь последующий период наблюдений отмечался в слабо осушенных почвах. В интенсивно осушенных – только в октябре, летнему периоду сопутствовал отрицательный прирост. Специфика сезонной кинетики фермента по горизонтам почв: положительные приросты фиксировались лишь в поверхностных 0–5 см и отличались максимальными темпами в слабо осушенных почвах.

Парная регрессионная связь активности анаэробной дегидрогеназы, подвижных форм железа и биогенных компонентов аппроксимируется полиномом второго порядка средней и высокой тесноты. Кумулятивная доля объясненной сезонной дисперсии фермента данными множествами составила в почвах слабого осушения 61 и 25%, интенсивного – 41 и 44% соответственно. Железо-органические комплексы и аммоний выявлены ведущими химическими факторами, контролирующими колебание анаэробной дегидрогеназы лесных торфяных почв независимо от режима осушения. Система Fe^{3+} – Fe^{2+} дифференцируется в связи с глубиной гидромелиорации. Как доминантный фактор ион Fe^{3+} установлен в условиях слабого осушения, Fe^{2+} – в режиме интенсивного.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках базового проекта Института леса им. В.Н. Сукачева СО РАН «Биоразнообразие лесов Сибири: эколого-динамический, генетико-селекционный, физико-химический и ресурсно-технологический аспекты» (№ FWES-2024-0028).

ЛИТЕРАТУРА

Агрохимические методы исследования почв. Москва: Наука, 1975. 656 с.

- Галиулин Р.В., Башкин В.Н., Галиулина Р.А. Оценка эффективности рекультивации почв в условиях добычи углеводородов посредством анализа активности дегидрогеназы // *Агрохимия*. 2014. № 6. С. 84–88.
- Ефремов С.П., Ефремова Т.Т. Влияние осушения на загруженность торфяной почвы корнями древесных и травянистых растений // *Комплексная оценка болот и заболоченных лесов в связи с их мелиорацией*. Новосибирск: Наука, 1973. С. 113–127.
- Ефремова Т.Т. Почвообразование и диагностика торфяных почв болотных экосистем // *Почвоведение*. 1992. № 12. С. 25–35.
- Ефремова Т.Т., Ефремов С.П., Мелентьева Н.В. Водные ресурсы болот России и оценка их химического состава // *География и природные ресурсы*. 1998. № 2. С. 79–84.
- Ефремова Т.Т., Овчинникова Т.М., Суховольский В.Г. Многопараметрический анализ почвенных свойств лесных осушенных болот Западной Сибири // *Почвоведение*. 2006. № 6. С. 657–667.
- Ефремова Т.Т., Овчинникова Т.М. Оксидоредуктазная активность торфяных почв как показатель глубины биохимической трансформации лесных осушенных болот Западной Сибири // *Известия Российской академии наук. Серия биологическая*. 2007. № 3. С. 360–367.
- Загуральская Л.М. Микронаселение торфяно-болотных почв Томской области // *Взаимоотношение леса и болота*. Москва: Наука, 1967. С. 56–81.
- Инишева Л.И. Закономерности функционирования болотных экосистем в условиях воздействия природных и антропогенных факторов. Томск: Изд-во ТПУ, 2020. 482 с.
- Кауричев И.С., Орлов Д.С. Окислительно-восстановительные процессы и их роль в генезисе и географии почв. Москва: Колос, 1982. 247 с.
- Козловская Л.С., Медведева В.М., Пьявченко Н.И. Динамика органического вещества в процессе торфообразования. Ленинград: Наука, 1978. 176 с.
- Кононова М.М. Органическое вещество почвы. Москва: Изд-во АН СССР, 1963. 314 с.
- Купревич В.Ф., Щербакова Т.А. Почвенная энзимология. Минск: Наука и техника, 1966. 275 с.
- Лучинок Л.Н., Баран С.Г., Тулина А.С., Семенов В.М. Влияние способа сельскохозяйственного использования на ферментативную активность торфяных почв Полесья и эмиссию CO₂ // *Мелиорация*. 2013. № 2 (70). С. 55–64.
- Пьявченко Н.И. О диагностике типов торфяных почв и залежей при изысканиях и проектировании лесосушительных мелиораций // *Исследования по лесному болотоведению и мелиорации*. Петрозаводск, 1978. С. 5–24.
- Рубин Б.А. Курс физиологии растений. Москва: Высшая школа, 1971. 671 с.
- Скрынникова И.Н. Классификация целинных болотных и мелиоративных торфяных почв СССР // *Почвоведение*. 1964. № 5. С. 14–27.
- Хазиев Ф.Х. Системно-экологический анализ ферментативной активности почв. Москва: Наука, 1982. 203 с.
- Хазиев Ф.Х. Методы почвенной энзимологии. Москва: Наука, 2005. 252 с.
- Хазиев Ф.Х. Экологические связи ферментативной активности почв // *Экобиотех*. 2018. Том 1. № 2. С. 80–92. <https://doi.org/10.31163/2618-964X-2018-1-2-80-92>
- Халафян А.А. STATISTICA 6. Статистический анализ данных. 3-е изд. Москва: ООО «Бином-Пресс», 2007. 515 с.
- Чекотовский Э.В. Графический анализ статистических данных в Microsoft Excel 2000. Москва: Издательский дом «Вильямс», 2002. 464 с.
- Allison S.D. Soil minerals and humic acids enzyme stability: implications for ecosystem processes // *Biogeochemistry*. 2006. Vol. 81. P. 361–373. <https://doi.org/10.1007/s10533-006-9046-2>
- Baldrian P., Štursová M. Enzymes in Forest Soils // *Soil Enzymology. Soil Biology*, vol 22. / G. Shukla, A. Varma (eds.). Berlin, Heidelberg: Springer, 2010. P. 61–73. https://doi.org/10.1007/978-3-642-14225-3_4
- Borowic A., Wyszowska J., Kucharski M., Kucharski J. Resistance of dehydrogenases, catalase, urease and plants to soil contamination with zinc // *Journal of Elementology*. 2014. Vol. 19. No. 4. P. 929–936. <https://doi.org/10.5601/jelem.2013.18.4.566>
- Brzezińska M., Stępniewska Z., Stępniewski W. Dehydrogenase and catalase activity of soil irrigated with municipal wastewater // *Polish Journal of Environmental Studies*. 2001. Vol. 10. No. 5. P. 307–311.

Burns R.G., DeForest J.L., Marxsen J., Sinsabaugh R.L., Stromberger M.E., Wallenstein M.D., Weintraub M.N., Zoppini A. Soil enzymes in a changing environment: Current knowledge and future directions // *Soil Biology and Biochemistry*. 2013. Vol. 58. P. 216–234. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.11.009>

Caldwel B.A. Enzyme activities as a component of soil biodiversity: A review // *Pedobiologia*. 2005. Vol. 49. No. 6. P. 637–644. <https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2005.06.003>

Karaca A., Cetin S.C., Turgau O.S., Kizilkaya R. Soil enzymes as indication of soil quality // *Soil Enzymology. Soil Biology*, vol 22. / G. Shukla, A. Varma (eds.). Berlin, Heidelberg: Springer, 2010. P. 119–148. https://doi.org/10.1007/978-3-642-14225-3_7

Makoi J.H., Mdakidemi P.A. Selected soil enzymes: examples of their potential roles in the ecosystem // *African Journal of Biotechnology*. 2008. Vol. 7. No. 3. P. 181–191.

Schaefer R. L'activité déshydrogénasique comme mesure de l'activité biologique globale des sols // *Annales Institut Pasteur*. 1963. Vol. 105. No. 2. P. 326–331.

Sinsabaugh R.L. Phenol oxidase, peroxidase and organic matter dynamics of soil // *Soil Biology and Biochemistry*. 2010. Vol. 42. No. 3. P. 391–404. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2009.10.014>

Поступила в редакцию 20.03.2024

Принята 21.06.2024

Опубликована 22.07.2024

Сведения об авторах:

Ефремова Тамара Тимофеевна – доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории фитоценологии и лесного ресурсоведения Института леса им. В.Н. Сукачева СО РАН – обособленное подразделение ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр СО РАН» (г. Красноярск, Россия); efr2@ksc.krasn.ru

Ефремов Станислав Петрович – доктор биологических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории фитоценологии и лесного ресурсоведения Института леса им. В.Н. Сукачева СО РАН – обособленное подразделение ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр СО РАН» (г. Красноярск, Россия); efr2@ksc.krasn.ru

Аврова Ада Фёдоровна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории фитоценологии и лесного ресурсоведения Института леса им. В.Н. Сукачева СО РАН – обособленное подразделение ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр СО РАН» (г. Красноярск, Россия); avrova@ksc.krasn.ru

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.



Статья доступна по лицензии [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Seasonal activity of anaerobic dehydrogenase of peat soils as related with some chemical factors of the redox environment of drained forest mires

© 2024 Т. Т. Efremova , S. P. Efremov , A. F. Avrova 

Sukachev Institute of Forest of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences – Division of Federal Research Center “Krasnoyarsk Scientific Center of the Siberian Branch of the RAS”, Akademgorodok, 50, bild. 28, Krasnoyarsk, Russia. E-mail: efr2@ksc.krasn.ru

The aim of the study was to study the specifics of seasonal fluctuations of anaerobic dehydrogenase of peat soils under the influence of forestry hydromelioration, a powerful exogenous factor affecting the speed and direction of biochemical processes.

Location and time of the study. The southern taiga one of West Siberia during June–October 2001–2003 (geographical coordinates 56°23'071" NL, 84°34'04" EL).

Methods. Investigation of the seasonal dynamics of the activity of anaerobic dehydrogenase and chemical components of the soil environment – C, NH₄⁺, Fe²⁺, Fe³⁺, Fe_c (associated with organic matter) using the method of systemic ecological analysis.

Results. The profile of drained forest peat soils was clearly differentiated into three zones: 0–5 cm of high anaerobic dehydrogenase activity, 5–10 cm of moderate activity and 10–30 cm of low activity of the enzyme. The main trend in seasonal fluctuations of the dehydrogenase activity from June to October was approximated by a

second-order parabola. According to the regression equation parameters, in poorly drained soils the weekly increase in dehydrogenase activity averaged 0,205 units with a weekly average deceleration of 0,022. In the strongly drained soils, there was a weekly deceleration of 0,131 with a weekly average acceleration of 0,022 units. Positively increased activity of anaerobic dehydrogenase was measured in 0-5 cm soil horizons, with the highest rates detected under poor drainage. Downwards the profile, there was mainly a negative increase during the entire observation period. A functional relationship between the activity of anaerobic dehydrogenase, mobile forms of iron, water-soluble organic matter and ammonium of medium and high density according to the type of parabola was revealed.

Conclusions. *The chemical components of the aqueous extract are the most important environmental factors controlling the kinetics of enzymatic reactions of peat soils. The cumulative proportion of the explained dispersion of dehydrogenase activity by mobile forms of iron (Fe^{2+} , Fe^{3+} , Fe_c) was 61 and 41%, by biogenic elements (organic matter and NH_4^+) – 25 and 44% respectively in weakly and intensively drained soils. The dominant factors determining seasonal fluctuations of the enzyme are iron-organic complexes and ammonium, regardless of the drainage regime, and oxidized iron under poor and reduced iron under strong drainage, respectively.*

Keywords: *seasonal fluctuations trend; increase and decrease rate; mobile forms of iron; water-soluble organic matter; ammonium; cumulative contribution; regression models; canonical analysis.*

How to cite: *Efremova T.T., Efremov S.P., Avrova A.F. Seasonal activity of anaerobic dehydrogenase of peat soils as related with chemical factors of the redox environment of drained forest mires. The Journal of Soils and Environment. 2024. 7(2). e256. DOI: [10.31251/pos.v7i2.256](https://doi.org/10.31251/pos.v7i2.256) (in Russian with English abstract).*

FUNDING

The study was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. FWES-2024-0028).

REFERENCES

- Agrochemical methods of soil research. Moscow: Nauka Publ., 1975. 656 p. (in Russian).
- Galiulin R.V., Bashkin V.N., Galiulina R.A. Recultivation of soils under conditions of hydrocarbon production: efficiency assessment by dehydrogenase activity analysis. *Agrokhimia*. No. 6. P. 84–88. (in Russian).
- Efremov S.P., Efremova T.T. The effect of drainage on the loading of peat soil with roots of woody and herbaceous plants. In book: *Complex assessment of swamps and swampy forests in connection with their reclamation*. Novosibirsk: Nauka Publ., 1973. P. 113–127. (in Russian).
- Efremova T.T. Soil formation and diagnostics of peat soils of swamp ecosystems. *Pochvovedenie*. 1992. No. 12. P. 25–35. (in Russian).
- Efremova T.T., Efremov S.P., Melentyeva N.V. Water resources of Russian marshes and assessment of their chemical composition. *Geografia i prirodnye resursy*. 1998. No. 2. P. 79–84. (in Russian).
- Efremova T.T., Ovchinnikova T.M., Sukhovol'skii V.G. Multiparametric analysis of soil properties in the drained forest bogs of Western Siberia. *Eurasian Soil Science*. 2006. Vol. 39. No. 6. P. 588–596. <https://doi.org/10.1134/S1064229306060020>
- Efremova T.T., Ovchinnikova T.M. Oxidoreductase activity of peat soils as an indicator of the degree of biochemical transformation of drained and forested bogs in West Siberia. *Biology Bulletin*. 2007. Vol. 34. No. 3. P. 297–302. <https://doi.org/10.1134/S1062359007030132>
- Zagurskaya L.M. Micro-population of peat-swamp soils of the Tomsk region. In book: *The relationship of forests and swamps*. Moscow: Nauka Publ., 1967. P. 56–81. (in Russian).
- Inisheva L.I. Special features of mire ecosystems functioning under the influence of natural and anthropogenic factors. Tomsk: Publ. House of TSPU, 2020. 482 p. (in Russian).
- Kaurichev I.S., Orlov D.S. Redox processes and their role in the genesis and geography of soils. Moscow: Kolos Publ., 1982. 247 p. (in Russian).
- Kozlovskaya L.S., Medvedeva V.M., Piavchenko N.I. Dynamics of organic matter in the process of peat formation. Leningrad: Nauka Publ., 1978. 176 p. (in Russian).
- Kononova M.M. Organic matter of the soil. Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1963. 314 p. (in Russian).
- Kuprevich V.F., Shcherbakova T.A. Soil enzymology. Minsk: Science and Technology, 1966. 275 p. (in Russian).

- Luchenok L.N., Baran S.G., Tulina A.S., Semenov V.M. Influence of the way of agricultural use on fermentativny activity of peat soils of Polesye and CO₂ emission. Land Reclamation. 2013. No. 2 (70). P. 55–65. (in Russian).
- Piavchenko N.I. On the diagnosis of types of peat soils and deposits in the exploration and design of forest drainage reclamation. In book: Research on forest swamp management and reclamation. Petrozavodsk, 1978. P. 5–24. (in Russian).
- Rubin B.A. Course of plant physiology. Moscow: Higher School Publ., 1971. 671 p. (in Russian).
- Skrynnikova I.N. Classification of virgin marsh and reclamation peat soils of the USSR. Pochvovedenie. 1964. No. 5. P. 14–27. (in Russian).
- Khaziev F.Kh. System-ecological analysis of the enzymatic activity of soils. Moscow: Nauka Publ., 1982. 203 p. (in Russian).
- Khaziev F.Kh. Methods of soil enzymology. Moscow: Nauka Publ., 2005. 252 p. (in Russian).
- Khaziev F.Kh. Ecological relations of the enzymatic activity of soil. Ecobiotech. 2018. Vol. 1. No. 2. P. 80–92. (in Russian). <https://doi.org/10.31163/2618-964X-2018-1-2-80-92>
- Khalafyan A.A. STATISTICA 6. Statistical data analysis. 3rd ed. Moscow: Binom-Press, 2007. 515 p. (in Russian).
- Chekotovskiy E.V. Graphical analysis of statistical data in Microsoft Excel 2000. Moscow: Publishing house “Williams”, 2002. 464 p. (in Russian).
- Allison S.D. Soil minerals and humic acids enzyme stability: implications for ecosystem processes. Biogeochemistry. 2006. Vol. 81. P. 361–373. <https://doi.org/10.1007/s10533-006-9046-2>
- Baldrian P., Štursová M. Enzymes in Forest Soils. In book: Soil Enzymology. Soil Biology, vol 22. / G. Shukla, A. Varma (eds.). Berlin, Heidelberg: Springer, 2010. P. 61–73. https://doi.org/10.1007/978-3-642-14225-3_4
- Borowic A., Wyszowska J., Kucharski M., Kucharski J. Resistance of dehydrogenases, catalase, urease and plants to soil contamination with zinc. Journal of Elementology. 2014. Vol. 19. No. 4. P. 929–936. <https://doi.org/10.5601/jelem.2013.18.4.566>
- Brzezińska M., Stępniewska Z., Stępniewski W. Dehydrogenase and catalase activity of soil irrigated with municipal wastewater. Polish Journal of Environmental Studies. 2001. Vol. 10. No. 5. P. 307–311.
- Burns R.G., DeForest J.L., Marxsen J., Sinsabaugh R.L., Stromberger M.E., Wallenstein M.D., Weintraub M.N., Zop-pini A. Soil enzymes in a changing environment: Current knowledge and future directions. Soil Biology and Biochemistry. 2013. Vol. 58. P. 216–234. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.11.009>
- Caldwel B.A. Enzyme activities as a component of soil biodiversity: A review. Pedobiologia. 2005. Vol. 49. No. 6. P. 637–644. <https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2005.06.003>
- Karaca A., Cetin S.C., Turgau O.S., Kizilkaya R. Soil enzymes as indication of soil quality. In book: Soil Enzymology. Soil Biology, vol 22. / G. Shukla, A. Varma (eds.). Berlin, Heidelberg: Springer, 2010. P. 119–148. https://doi.org/10.1007/978-3-642-14225-3_7
- Makoi J.H., Mdakidemi P.A. Selected soil enzymes: examples of their potential roles in the ecosystem. African Journal of Biotechnology. 2008. Vol. 7. No. 3. P. 181–191.
- Schaefer R. L’activité déshydrogénasique comme mesure de l’activité biologique globale des sols. Annales Institut Pasteur. 1963. Vol. 105. No. 2. P. 326–331.
- Sinsabaugh R.L. Phenol oxidase, peroxidase and organic matter dynamics of soil. Soil Biology and Biochemistry. 2010. Vol. 42. No. 3. P. 391–404. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2009.10.014>

Received 20 March 2024

Accepted 21 June 2024

Published 22 July 2024

About the authors:

Tamara T. Efremova – Doctor of Biological Sciences, Leading Researcher in the Laboratory of Phytocoenology and Forest Resource Studies in the Institute of Forest of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences – Division of Federal Research Center “Krasnoyarsk Scientific Center of the Siberian Branch of the RAS” (Krasnoyarsk, Russia); efr2@ksc.krasn.ru

Stanislav P. Efremov – Doctor of Biological Sciences, Professor, Principal Researcher in the Laboratory of Phytocoenology and Forest Resource Studies in the Institute of Forest of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences – Division of Federal Research Center “Krasnoyarsk Scientific Center of the Siberian Branch of the RAS” (Krasnoyarsk, Russia); efr2@ksc.krasn.ru

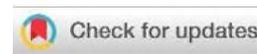
Ada F. Avrova – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher in the Laboratory of Phytocoenology and Forest Resource Studies in the Institute of Forest of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences – Division of Federal Research Center “Krasnoyarsk Scientific Center of the Siberian Branch of the RAS” (Krasnoyarsk, Russia); avrova@ksc.krasn.ru

The authors read and approved the final manuscript



The article is available under [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

УДК 574.4:550.84

<https://doi.org/10.31251/pos.v7i2.258>

Запасы фитомассы и деструкция растений-торфообразователей на начальных этапах разложения в условиях ненарушенных и постпирогенных торфяников Западной Сибири

© 2024 Л. Г. Никонова , Д. А. Калашникова , Е. А. Головацкая , Г. В. Симонова 

ФГБУН Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Академический проспект, 10/3, г. Томск, 634055, Россия. E-mail: nikonovalilig@gmail.com

Цель исследования. Оценка запасов фитомассы и скорости разложения органического вещества растений-торфообразователей в условиях торфяных залежей ненарушенных и постпирогенных торфяников на начальных этапах деструкции.

Место и время проведения. Исследования проведены в мае-сентябре 2022 г. на двух олиготрофных болотах – Бакчарском (стационар «Васюганье», ИМКЭС СО РАН) и Иксинском, являющихся северо-восточными отрогами Большого Васюганского болота и расположенных в Бакчарском и Шегарском районах Томской области.

Методы. Запасы растительного вещества определяли укосным методом. Выделяли следующие фракции: живая фитомасса (однолетняя и многолетняя фотосинтезирующая фитомасса – зеленые части трав, листья кустарничков, мох), многолетняя нефотосинтезирующая фитомасса (стебли кустарничков, корни трав и кустарничков) и мертвая фитомасса – мортмасса (опад, моховой очес, ветошь). Скорость разложения растительных остатков оценивали методом закладки растений в торф (отдельно *Chamaedaphne calyculata* и *Sphagnum fuscum*, а также смешанный образец, состоящий из 60% *S. fuscum* и 40% *Ch. calyculata*). В исходных образцах и после разложения определяли зольность методом сухого озоления, содержание общего углерода и азота, а также изотопный состав углерода и азота при помощи изотопного масс-спектрометра DELTA V Advantage.

Основные результаты. Краткосрочное исследование, проведенное во время вегетационного периода в условиях ненарушенного (Естественный рям) и подверженного пирогенному воздействию (Гарь) фитоценозов показало, что за счет значительного количества мортмассы (2402 г/м²) Естественный рям обладает запасом органического вещества, превышающим таковой в условиях Гари в 1,7 раз. В среднем потеря 59% органического вещества от общих потерь за вегетационный период приходится на первый месяц. Как в условиях Гари, так и в условиях Естественного рьяма минимальные потери органического вещества свойственны *Sphagnum fuscum* (3,1 и 3,5%); для остальных образцов условия Гари были более благоприятны для разложения на начальных этапах деструкции. Смешанный образец по потерям массы занимает промежуточное положение между своими отдельными компонентами. Потери углерода хорошо коррелируют с потерями массы как в течение 1 месяца деструкции ($r=0,87$), так и за 4 месяца ($r=0,96$). В отличие от углерода, на начальных этапах деструкции азот накапливался в Смешанном образце (как через один, так и через четыре месяца).

Заключение. При меньших запасах фитомассы на участках постпирогенной сукцессии, более активные деструкционные процессы на начальных этапах разложения органического вещества растительных остатков происходят именно в этих условиях. Показано влияние постпирогенной сукцессии на скорость разложения органического вещества растительных остатков *Chamaedaphne calyculata* и смеси остатков *S. fuscum* и *Ch. calyculata*. В течение первого месяца деструкции происходило наиболее интенсивное разложение опада. В условиях горелого болота наблюдался более интенсивный вынос азота из всех растительных остатков и накопление зольных элементов в образцах *Sphagnum fuscum*. Смешивание компонентов опада оказывало влияние как на скорость, так и на динамику разложения. Изотопный состав углерода и азота начинал изменяться уже на начальных этапах деструкции: происходило обогащение тяжелыми изотопами ¹⁵N и ¹³C. Данное исследование подчеркивает важность изучения процессов разложения растительного опада на начальных этапах и учета компонентного состава при анализе процессов трансформации органического вещества.

Ключевые слова: торфяные олиготрофные почвы; гистосоли; *Sphagnum fuscum*; *Chamaedaphne calyculata*; деструкция органического вещества; изотопный состав азота и углерода ($\delta^{15}\text{N}$ и $\delta^{13}\text{C}$); постпирогенные торфяники.

Цитирование: Никонова Л.Г., Калашникова Д.А., Головацкая Е.А., Симонова Г.В. Запасы фитомассы и деструкция растений торфообразователей на начальных этапах разложения в условиях ненарушенных и постпирогенных торфяников Западной Сибири // Почвы и окружающая среда. 2024. Том 7. № 2. e258. DOI: [10.31251/pos.v7i2.258](https://doi.org/10.31251/pos.v7i2.258)

ВВЕДЕНИЕ

Постоянство биологических систем напрямую зависит от круговорота углерода, особую роль в поддержании которого играют болотные экосистемы. Одной из ключевых особенностей болот является их способность накапливать углерод в виде торфа за счет медленной скорости трансформации органического вещества. Мировые запасы углерода, накопленные в торфе, превышают количество углерода, хранящегося в растительности, и по размеру сопоставимы с текущим запасом углерода в атмосфере (Turetsky et al., 2015). В любых экосистемах для формирования фитомассы растениям необходим углекислый газ; в дальнейшем, после отмирания, растительные остатки подвергаются минерализации, окисленный углерод снова возвращается в атмосферу. Таким образом, продукционно-деструкционные процессы являются основными и важнейшими процессами на нашей планете (Титлянова и др., 2023). Активное накопление углерода происходит в течение вегетационного периода в результате прироста растительной массы (Fortuniak, Rawlak, 2014). Показателем скорости накопления органического углерода растительностью является чистая первичная продукция. Величина продуктивности зависит от видового состава фитоценоза, гидрологических и климатических условий (Базилевич, 1993). Главными факторами, оказывающими влияние на скорость разложения органического вещества, являются условия среды, химический состав самих растений-торфообразователей и активность микроорганизмов (Денисенков, 2000). Наиболее интенсивно деструкция органического вещества протекает в летнее время года, когда уровень болотных вод понижается и атмосферный кислород свободно проникает в верхние горизонты торфяной толщи. В зимний период наблюдается ослабление процессов разложения, связанное с понижением активности микроорганизмов (Козловская и др., 1978; Миронычева-Токарева и др., 2013; Головацкая, Никонова, 2017). Наибольшие потери массы в процессе разложения органического вещества растительного опада в торфяных залежах происходят именно на первых стадиях (Коронатова, 2010; Вишнякова и др., 2012; Peltoniemi et al., 2012; Filippova, Glagolev, 2018), т.к. микроорганизмы в первую очередь разрушают легкодоступные компоненты, содержание которых со временем убывает и скорость разложения снижается (Боч, Мазинг, 1979). На начальных этапах деструкции наибольшее влияние на скорость разложения оказывают климатические условия (температура и влажность), однако со временем особенности самих растений играют все более значимую роль (Никонова et al., 2023). Сам растительный опад можно распределить по стойкости на 2 группы: (1) быстроразлагающиеся растительные остатки – не фиксирующиеся в ботаническом составе органического слоя болотных почв (листья *Chamaedaphne calyculata*, *Menyanthes trifoliata*, разнотравье); (2) стабильные растительные остатки – постоянно фиксирующиеся в ботаническом составе торфа (все фракции большинства кустарничков, узлы кущения, корни и корневища трав, относящихся к родам *Carex*, *Scheuchzeria*, *Eriophorum*, все сфагновые мхи) (Козловская и др., 1978; Вишнякова и др., 2012; Никонова и др., 2019; Berg, 2014).

Современные климатические изменения могут привести к ускорению процесса разложения органического вещества и, как следствие, к уменьшению мировых запасов торфа (Hogg et al., 1992). Пожары также способны повлиять на запасы углерода в торфе и скорость его выделения в атмосферу как за счет самого процесса горения, так и косвенно, за счет ускорения процесса деструкции самого торфа и растительных остатков в процессе постпирогенной сукцессии (Sommers et al., 2014). В связи с этим целью данной работы являлась оценка скорости разложения органического вещества растений-торфообразователей в условиях торфяных залежей ненарушенных и постпирогенных торфяников на начальных этапах деструкции.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проводили в болотных фитоценозах, относящихся к северо-восточным отрогам Васюганского болота, расположенных в Бакчарском и Шегарском районах Томской области: относительно ненарушенный сосново-кустарничково-сфагновый фитоценоз болота «Бакчарское» – Естественный рям (56°52'31,7" с.ш., 82°48'27,3" в.д.) и сосново-березово-пушицево-сфагновый фитоценоз болота «Иксинское» с явно выраженными следами пирогенного воздействия – Гарь (56°52'03,4" с.ш., 83°11'52,1" в.д.) (Никонова и др., 2023). Изучаемые участки расположены в подзоне южной тайги Западной Сибири и характеризуются континентальным климатом. Средняя годовая температура составляет 0,50 °С, годовое количество осадков 497 мм за 1991–2020 годы. Средние температуры воздуха января и июля составляют –18,8 и +18,2 °С, соответственно (ВНИИГМИ-МЦД, meteo.ru). Выбранные точки исследования обладают рядом уникальных характеристик, которые могут оказать значительное влияние на процесс трансформации органического вещества. С 1970-х

годов на этих болотах функционирует мелиоративная сеть каналов, в результате чего на территории болот произошли кардинальные изменения природной среды, в частности, осушение значительных участков болот, что стало причиной массовых лесных и торфяных пожаров (Базанов и др., 2002). Естественный рям, представляет собой типичный для олиготрофных болот фитоценоз; находится на водораздельном плато в междуречье рек Бакчар и Икса, близко к осушительной сети, но за ее пределами. Следы осушения проявляются в виде подсыхания краевых зон, расположенных в достаточной отдаленности от точек исследования, в связи с этим рям может считаться относительно ненарушенным. Глубина торфяной залежи Естественного рьяма достигает 320 см, а плотность верхних слоев торфа (0-10 см) – 34,8 кг/м³. Древесный ярус образован *Pinus sylvestris* L., высота деревьев составляет 2–3 метра (проективное покрытие около 50%), кустарничковый ярус хорошо развит и состоит преимущественно из *Ledum palustre* L. и *Chamaedaphne calyculata* Moench. Среди мхов абсолютным доминантом является *Sphagnum fuscum* Klinggr., травы встречаются редко, в основном *Eriophorum vaginatum* и *Rubus chamaemorus*. Иксинское болото расположено в междуречье рек Икса и Шегарка; в 1998 году на его осушенном участке произошло выгорание значительной территории, в результате чего был полностью уничтожен растительный покров с приповерхностной толщи торфа на болотах, а также почвенный покров в заболоченных и автоморфных лесах (Базанов и др., 2002). В ранних исследованиях, до пожара, территория Иксинского болота, выбранная нами для изучения, упоминается как верховое болото (Кудрявцев, 1969; Храмов, Валуцкий, 1977; Трифонова и др., 2010). На данный момент, Гарь характеризуется несколько иным фитоценотическим разнообразием. Древесный ярус сильно разрежен и образован главным образом подростом *Pinus sylvestris*, однако встречаются отдельные редкостоящие березы *Betula pubescens* высотой до 15 м. Кустарнички встречаются крайне редко. Хорошо выражен травянистый ярус, образованный многочисленными кочками *Carex limosa* и *Eriophorum vaginatum*. Моховой ярус представлен многообразием сфагновых мхов, изредка встречаются бриевые мхи, в частности, *Polytrichum commune*. Глубина торфяной залежи достигает 90 см, верхние слои (0-10 см) торфа имеют плотность 33,2 кг/м³. На территории изучаемого участка повсюду встречаются следы пожара: поваленные деревья, обгорелая кора уцелевших деревьев. Судя по всему, данный участок был подвержен в большей степени пожару, чем вышеописанный. Результаты предыдущего исследования (Никонова и др., 2019) показали, что температура торфяной залежи в исследуемых фитоценозах, также отличается. Условия на Естественном рьяме оказались более прохладными, по сравнению с Гарью (на +1,5 и +1,7 °С в мае и июне, соответственно). Также, в работе (Никонова, Головацкая, 2020) отмечалось, что участок Гарь является более обводненным в период вегетации, чем Естественный рям, уровень болотных вод –24 см и –30 см, соответственно. Согласно показателю рН болотных вод, реакция среды в исследуемых фитоценозах кислая: в Естественном рьяме 4,05, а в Гари – 4,65.

Исследование включало оценку запасов фитомассы и мортмассы напочвенного покрова в период максимального ее развития (конец июля – начало августа) укосным методом (Косых и др., 2003; Kosykh et al., 2008). Для этого растительное вещество собирали с площадок размером 50×50 см в трехкратной повторности. Растительное вещество разбирали по фракциям в соответствии с возрастом и функциональными особенностями: живая фитомасса (однолетняя и многолетняя фотосинтезирующая фитомасса – зеленые части трав, листья кустарничков, мох), многолетняя нефотосинтезирующая фитомасса (стебли кустарничков, корни трав и кустарничков) и мертвая фитомасса – мортмасса (опад, моховой очес, ветошь). Границу очеса и живой части мха определяли визуально по изменению цвета сфагновых мхов. Моховой очес – это отмершие части мхов, еще сохраняющие связь с живой частью растений, а ветошь – отмершие части трав, еще не потерявшие связь с растением (в основном наличие ветоши характерно для осок, пушиц). Опавшим считали отмершие части трав и кустарничков. Опавшим собирали с поверхности площадок 50×50 см после того, как срезали кустарнички и травы, и перед тем, как вырезали монолит для оценки запасов корней и мохового очеса. С каждой площадки отбирали монолиты площадью 10×10 см и глубиной 20 см. Разобранное по фракциям растительное вещество высушивали при температуре 80 °С и взвешивали. Единицей измерения запасов фитомассы является г/м².

Определение скорости разложения растительного опада проводили методом закладки растений в торф (Козловская и др., 1978). Исследовали скорость деструкции основных растений-торфообразователей олиготрофных болот Западной Сибири: листья кустарничка *Chamaedaphne calyculata* Moench., очес мха *Sphagnum fuscum* Klinggr. Растительные образцы для исследования собирали на Естественном рьяме Бакчарского болота. Кроме отдельных видов растений, приготавливали Смешанный образец, представляющий смесь исследуемых растений в соответствии с

долей каждого вида в растительном опаде наиболее типичного естественного фитоценоза, состоящий из *S. fuscum* (60%) и *Ch. calyculata* (40%). В лабораторных условиях собранные растения высушивали до воздушно-сухого веса и раскладывали в мешочки из синтетического материала по 15 г. Приготовленный растительный материал закладывали в торфяную залежь в мае, на глубину 10 см от поверхности в трехкратной повторности. Образцы с растительным материалом извлекали в июне и сентябре (через 1 и 4 месяца после начала эксперимента). В образцах определяли убыль массы растительного вещества весовым методом.

Скорость разложения рассчитывали как процент потери массы через 1 и 4 месяца по следующей формуле:

$$\text{Потери массы(\%)} = \frac{W_0 - W_t}{W_0} \times 100, \quad (1)$$

где W_0 – вес исходного образца (г), W_t – вес образца через 1 и 4 месяца (г).

В исходных образцах и образцах после эксперимента, с целью получения количественных характеристик потерь макроэлементов, была определена зольность методом сухого озоления (Дурынина, Егоров, 1998). Анализ содержания общего азота и общего углерода, а также изотопного состава углерода и азота проводился при помощи изотопного масс-спектрометра DELTA V Advantage (приборы предоставлены центром коллективного пользования ТомЦКП СО РАН).

Изотопный состав углерода и азота определялся методом масс-спектрометрии изотопных отношений легких элементов (Лебедев, 2013). Все образцы гомогенизировали, после чего навеску образца помещали в оловянные капсулы (олово высокой степени чистоты). Оптимальная масса навески образца для изотопного анализа углерода составляла 450–500 мкг, для изотопного анализа азота – 1400–1700 мкг. Запакованные в капсулы образцы помещались в автосамплер элементного анализатора Flash 2000. Капсула попадала в окислительный реактор, нагретый до 1020 °С и заполненный Cr_2O_3 и гранулами Co_3O_4 , сжигалась в потоке газа-носителя (гелий, 250 мл/мин) с одновременно поданным чистым кислородом (180 мл/мин). Полученные продукты окисления (CO_2 , N_xO_y) поступали в восстановительный реактор, где оксиды азота восстанавливались до N_2 . Для удаления воды использовали ловушку с перхлоратом магния. Углекислый газ и азот (N_2) по капилляру попадал в масс-спектрометр DELTA V Advantage через систему газораспределения Conflo II.

Изотопный состав определяли по формуле:

$$\delta^n X = \left[\frac{R_{\text{sample}} - R_{\text{standard}}}{R_{\text{standard}}} \right] \times 1000, \quad (2)$$

где nX – изотопы ^{13}C и ^{15}N (‰); R_{sample} – отношение тяжелого изотопа к легкому в исследуемом образце; R_{standard} – отношение тяжелого изотопа к легкому в стандарте.

Лабораторные рабочие газы сравнения (CO_2 , N_2) калибровали по международным стандартным образцам МАГАТЭ: для CO_2 – IAEA-CH-3 Cellulose ($\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}} = -24,72 \pm 0,04$ ‰); для N_2 – IAEA-600 Caffeine ($\delta^{15}\text{N}_{\text{airN}_2} = 1,0 \pm 0,2$ ‰). Среднеквадратическое отклонение измерений для трех повторностей анализируемых образцов не превышало для углерода 0,2‰, для азота 0,6‰.

Потери углерода, азота и зольных элементов рассчитывали, как процент от исходного содержания:

$$\text{Потери элемента(\%)} = \frac{X_0 - X_t}{X_0} \times 100, \quad (3)$$

где X_0 – исходное содержание элемента (мг/г), X_t – содержание элемента через 1 и 4 месяца (мг/г).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Оценка продуктивности фитоценозов показала максимальные запасы растительного вещества в условиях Естественного рьяма – $3519 \pm 214,8$ г/м², в условиях Гари – $2097 \pm 181,9$ г/м² (рис. 1). Следует отметить неравное соотношение вклада фотосинтезирующей и нефотосинтезирующей частей растений в общие запасы фитомассы в зависимости от фитоценоза. Запасы фотосинтезирующей фитомассы включают в себя запасы зеленых частей трав, мхов, кустарничков. По результатам наших исследований доля фотосинтезирующей массы растений близка в условиях Естественного рьяма и Гари ($603 \pm 46,4$ и $601 \pm 13,9$ г/м², соответственно). При этом максимальный вклад в

фотосинтезирующую фитомассу вносят зеленые части мхов (в среднем 89 % от всей фотосинтезирующей фитомассы). В условиях Естественного рьяма преобладает фотосинтезирующая фитомасса, а в условиях Гари – нефотосинтезирующая. Среди нефотосинтезирующей фитомассы, к которой относятся стебли, корни трав и кустарничков, в растительном покрове Гари значительно преобладают корни трав и кустарничков в отличие от Естественного рьяма. Согласно литературным данным (Дашкевич, Смоляк, 1993), после осушения и пожаров характерно угнетение роста сфагновых мхов и распространение осоковых и травяных ассоциаций, что отражается в запасах органического вещества не только фитомассы, но и мортмассы.

Согласно исследованиям Н.П. Миронычевой-Токаревой с соавторами (2013), доля мортмассы может составлять 50–80% от общей массы растительного вещества экосистемы и является важным показателем при изучении вопросов депонирования углерода. Мортмассу образуют отмершие части растений, такие как опад, ветошь трав и моховой очес. В наших исследованиях на долю мортмассы приходится 19–68% от общей массы растений фитоценозов (без учета древесного яруса), при этом максимальный вклад вносит моховой очес (88% от общей мортмассы). За счет большого количества мортмассы общая масса органического вещества в условиях Естественного рьяма превышает общую массу растительного вещества Гари в 1,7 раз. Возможно, это обуславливается значительным повреждением торфяной залежи при пирогенном воздействии в условиях Гари (рис. 1).

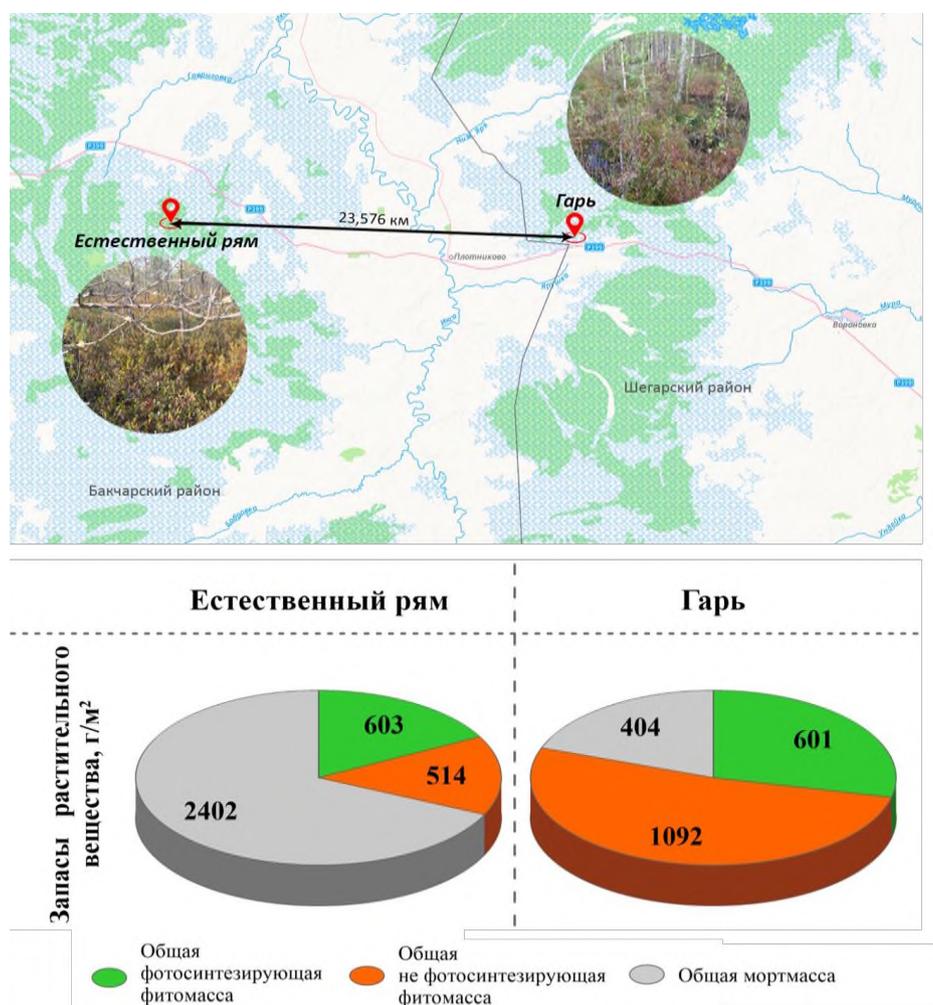


Рисунок 1. Запасы растительного вещества фитоценозов (г/м²): ненарушенного (Естественный рьям) и подверженного постпирогенной сукцессии (Гарь).

Исходя из исследований (Вишнякова и др., 2012; Prescott, 2010; Berg, 2014; Nikonova et al., 2023), болотная растительность обладает уникальными особенностями, определяющими как скорость, так и динамику разложения.

Исследуемые растения по химическому составу (табл. 1) значительно отличаются друг от друга – самым высоким содержанием углерода, азота, зольных элементов и наименьшим

соотношением C/N характеризуются листья *Ch. calyculata*. Очес *S. fuscum* обладает менее благоприятным для деятельности микроорганизмов химическим составом: наименьшим содержанием углерода и азота, высоким соотношением C/N и низкой зольностью. Смешанный образец по химическому составу занимает промежуточное положение между его отдельными компонентами, но обладает достаточно высоким соотношением C/N, что также может замедлять активность микроорганизмов-деструкторов.

Таблица 1

Исходный химический состав растений-торфообразователей (среднее±стандартное отклонение)

Растение	Зольность, %	C, %	N, %	C/N
<i>Ch. calyculata</i>	2,5±0,2	53,3±0,1	1,9±0,3	28
<i>S. fuscum</i>	1,8±0,1	45,1±0,1	0,7±0,3	65
Смешанный образец	1,9±0,2	51,5±0,1	1,0±0,3	51

По полученным результатам краткосрочного исследования за 4 месяца разложения, потери массы в условиях Естественного яра колеблются от 3,1 до 21,0%, в условиях Гари от 3,5 до 34,3% (рис. 2). За первый месяц деструкции происходит наиболее активный вынос органического вещества. Так, в условиях Естественного яра теряется в среднем 51% от общих потерь за 4 месяца, а в условиях Гари – 68%; особенно активное разложение зафиксировано для очеса мха – 75% от общих потерь за 4 месяца происходит именно в первый месяц деструкции. С попаданием свежего опада в торфяную залежь возможен всплеск активности микроорганизмов и, следовательно, интенсивное разложение органического вещества на ранних стадиях деструкции за счет разложения наиболее доступных компонентов (Добровольская, 2013). Также, гидротермические условия Гари оказывают, в основном, положительное влияние на процесс разложения на начальных этапах деструкции (потери массы в среднем на 3,9 и 5,1% выше, чем в условиях Естественного яра за 1 и 4 месяца, соответственно). Например, за 4 месяца для *Ch. calyculata* потери массы на 13,3%, а для Смешанного образца – на 1,7% выше по сравнению с разложением в Естественном яре. Однако разница в потерях *S. fuscum* в условиях Гари и Естественного яра незначительна, потери массы на гари всего на 0,4% выше.

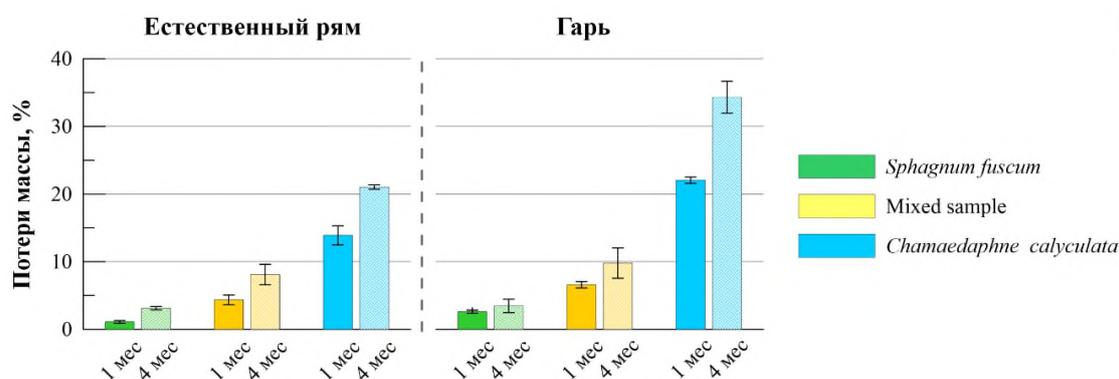


Рисунок 2. Потери массы опада растений-торфообразователей в торфяной залежи Естественного яра и Горелого яра (Гарь) за 1 и 4 месяца, % от исходной массы. Здесь и на рис. 3 представлены среднее арифметическое значение (столбик) и стандартное отклонение (вертикальная планка погрешности).

Среди исследуемых образцов наибольшая скорость разложения на начальных этапах, как и предполагалось исходя из химического состава растительного опада, выявлена для *Ch. calyculata* (21,0 и 34,3% в Естественном яре и Гари, соответственно). Гораздо медленнее процесс разложения протекает в образцах *S. fuscum* (3,1 и 3,5% в условиях Естественного яра и Гари, соответственно). Разложение Смешанного образца вызывает особый интерес; по потерям массы он занимает промежуточное положение между *S. fuscum* и *Ch. calyculata*, при этом в условиях Естественного яра характеризуется меньшими потерями массы (4,4 и 8,1% потерь массы за 1 и 4 месяца, соответственно). В модельных исследованиях (Nikonova et al., 2023) в строго контролируемых условиях, при разложении Смешанного образца на начальных этапах также наблюдались потери

массы, превышающие потери его отдельных компонентов, однако в дальнейшем, как и в наших исследованиях, Смешанный образец по потерям занимал промежуточное положение.

В ходе деструкции происходит изменение зольности, содержания общего углерода и азота, так как именно эти элементы являются ключевыми для микроорганизмов (Frost et al., 2005). Потери углерода хорошо коррелируют с потерями массы как в течение 1-го месяца деструкции ($r=0,87$), так и за 4 месяца ($r=0,96$). Уже на начальной стадии разложения (1-ый месяц) для всех исследуемых образцов наблюдается вынос углерода, достигающий в среднем 21,5%; к 4 месяцам вынос углерода значительно увеличивается и варьирует от 19,1 до 45,8%, при этом наибольшие изменения содержания углерода характерны для *Ch. calyculata* (39,3 и 45,8% в Естественном ряме и в Гари, соответственно). Минимальные потери характерны для очеса *S. fuscum*, при этом, как и потери массы, потери углерода в Гари и Естественном ряме близки (19,1 и 19,5%, соответственно). Смешанный образец, как в течение первого месяца, так и к концу эксперимента по потерям углерода занимает промежуточное положение (рис. 3).

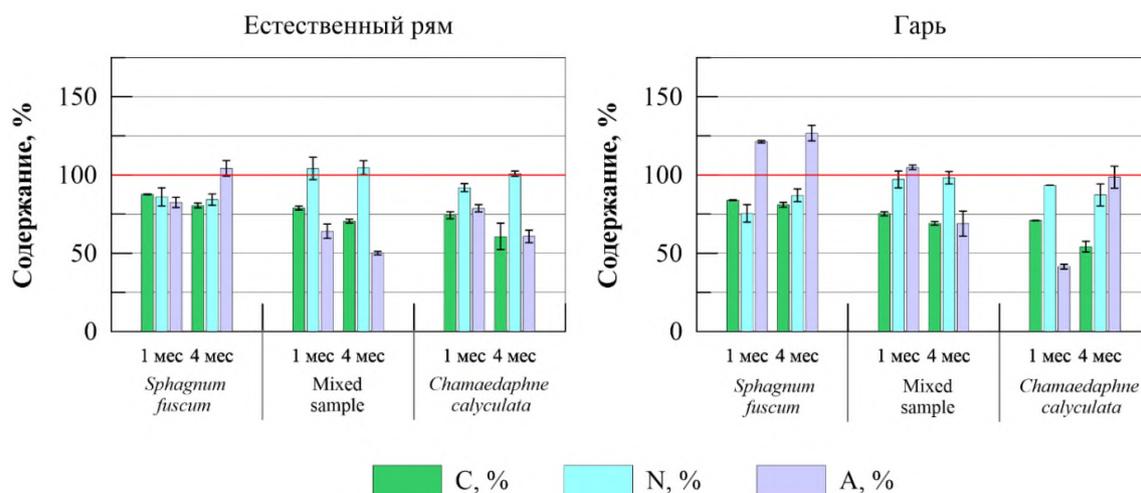


Рисунок 3. Изменение содержания общих углерода (С) и азота (N), зольности (А) в растительных остатках при разложении в торфяной залежи Естественного ряма и Горелого ряма (Гарь) за 1 и 4 месяца (по отношению к исходному количеству, %).

На начальном этапе деструкции динамика содержания азота вызывает особый интерес. За первый месяц во всех образцах, за исключением Смешанного, происходит вынос азота от 2,9 до 24,6%. При этом, в условиях Гари потери азота в среднем в 2 раза превышают потери в Естественном ряме. К 4 месяцам равномерный вынос азота из растительных остатков наблюдается лишь для *S. fuscum* в условиях Естественного ряма (потери азота достигают 15,8% от исходного значения) и *Ch. calyculata* в условиях Гари (потери азота достигают 12,8 % от исходного значения). Как в условиях Естественного ряма, так и в условиях Гари наиболее активный вынос азота характерен для *S. fuscum* (15,8 и 13,1% от исходного значения в Естественном ряме и в Гари, соответственно). В Смешанном образце в Естественном ряме, как за 1 месяц, так и за 4 месяца разложения происходит накопление азота. В процессе деструкции в растительных остатках может происходить как потеря, так и накопление азота (Козловская и др., 1978; Базилевич, Титлянова, 2008; Trentbath, Diggle, 1998). Для остальных образцов к 4-му месяцу деструкции происходит некоторый рост содержания азота, не превышающий исходного значения. Н.И. Базилевич и А.А. Титлянова (2008) отмечают, что на начальных этапах деструкции может наблюдаться, помимо минерализации, повышение концентрации азота в субстрате за счет разложения безазотистых соединений, азотфиксации и потребления азота гифами грибов из почвы. Освобождение минерального азота начинается лишь после достижения в подвергнувшемся деструкции материале предельной концентрации азота (Berg, Staaf, 1981; Trentbath, Diggle, 1998). В дальнейшем, в растениях, подвергающихся значительной минерализации, содержание азота начинает убывать. В то же время, согласно С.Г. Прокушкину с соавторами (2014), иммобилизация азота не всегда сопровождается усилением минерализации; возможно, это связано с наличием или синтезом труднорастворимых азотсодержащих веществ, что и способствует замедлению процесса минерализации.

В связи с неравнозначным изменением содержания углерода и азота в процессе деструкции происходит изменение такого важного показателя, как соотношения C/N. Согласно полученным

результатам, для всех образцов, кроме *S. fuscum*, происходит снижение значения уже в 1-ом месяце разложения. В дальнейшем наблюдается снижение этого показателя для всех изучаемых образцов. Снижение соотношения C/N указывает на последующую интенсификацию деструкционных процессов (Раковский, Пигулевская, 1978; Базилевич, Титлянова, 2008).

Важное влияние на динамику и скорость разложения оказывает зольность. В естественных условиях происходит снижение зольности в течение первого месяца разложения (рис. 3). В Смешанном образце и *S. fuscum* в условиях Гари происходит накопление зольных элементов. При этом накопление зольных элементов в течение первого месяца разложения в очесе *S. fuscum* превышало накопление в Смешанном образце в 5 раз (значение зольности увеличилось на 20,9 и 4,8%, соответственно). К 4-м месяцам деструкции в Смешанном образце происходит снижение содержания зольных элементов как в условиях Естественного рьяма, так и в условиях Гари. К 4-му месяцу деструкции фиксируется рост зольности в очесе *S. fuscum*, как в Естественном рьяме, так и в Гари, при этом постпирогенные условия способствуют более интенсивному накоплению зольных элементов. Известно, способность к биоаккумуляции у мхов намного выше, чем у других растений, ввиду уникальности их физиологии и морфологии (Никонов, 1955; Косых, Коронатова, 2010; Ляпина, 2015; Говоруха, 2017).

Очевидно, что изменение соотношения стабильных изотопов углерода и азота свидетельствует о биохимических процессах в экосистемах и влиянии окружающей среды на эти процессы (Тиунов, 2007; Robinson, 2001; Leavitt et al., 2008). Исходные образцы растений обладали низкими значениями изотопного состава углерода и азота, при этом очес *S. fuscum* отличался наиболее низкими значениями величин $\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{15}\text{N}$ (табл. 2). В результате наших исследований выявлено, что в ходе даже краткосрочной деструкции изотопный состав углерода и азота претерпевает изменение, причем фракционирование углерода происходит менее активно, в отличие от изменения изотопного состава азота. Изотопный состав углерода *Chamaedaphne calyculata*, как для 1-го месяца, так и за 4 месяца эксперимента, изменяется незначительно (в пределах погрешности измерения), при этом влияние условий места закладки образца (постпирогенный или ненарушенный участок) на изменение величины $\delta^{13}\text{C}$ не выявлено. Наиболее явные изменения изотопного состава углерода замечены для *Sphagnum fuscum*. В течение 1-го месяца эксперимента изотопный состав углерода изменяется более чем на 1‰ как в условиях Гари, так и в условиях Естественного рьяма, причем обогащение тяжелым изотопом углерода ^{13}C в условиях Естественного рьяма происходит немного быстрее, чем в постпирогенных условиях. К четвертому месяцу эксперимента изменение величины $\delta^{13}\text{C}$ *Sphagnum fuscum* становится незначительным. Для Смешанного образца в течение 1-го месяца процесса трансформации наблюдается тенденция к обогащению легким изотопом ^{12}C , однако к 4-му месяцу значение величины $\delta^{13}\text{C}$ возвращается к своему начальному значению.

Таблица 2

Изменение изотопного состава углерода и азота при разложении в торфяной залежи Естественного рьяма (Естественный) и Горелого рьяма (Гарь) за 1 и 4 месяца (среднее \pm стандартное отклонение)

Растение	Место закладки	$\delta^{13}\text{C}$, ‰			$\delta^{15}\text{N}$, ‰		
		исходный	ч/з 1 месяц	ч/з 4 месяца	исходный	ч/з 1 месяц	ч/з 4 месяца
1	Естественный	-30,3 \pm 0,2	-30,1 \pm 0,1	-30,1 \pm 0,5	-6,4 \pm 0,4	-6,4 \pm 0,1	-5,4 \pm 0,2
	Гарь		-30,1 \pm 0,1	-29,9 \pm 1,2		-6,6 \pm 0,4	-3,3 \pm 1,8
2	Естественный	-31,2 \pm 0,2	-29,5 \pm 0,2	-29,6 \pm 0,1	-11,7 \pm 0,4	-7,0 \pm 0,2	-7,5 \pm 1,4
	Гарь		-30,0 \pm 0,3	-29,9 \pm 0,3		-9,1 \pm 1,2	-5,6 \pm 0,3
3	Естественный	-29,5 \pm 0,3	-29,9 \pm 0,2	-29,4 \pm 0,2	-9,6 \pm 0,5	-7,1 \pm 0,1	-5,6 \pm 0,1
	Гарь		-30,1 \pm 0,3	-29,7 \pm 0,1		-7,4 \pm 0,1	-4,0 \pm 1,4

Примечание.

1 – *Chamaedaphne calyculata*; 2 – *Sphagnum fuscum*; 3 – Смешанный образец.

Обогащение тяжелым изотопом азота ^{15}N в процессе деструкции, а также влияние условий участков закладки наблюдается для всех растений. В течение первого месяца величина $\delta^{15}\text{N}$ для *Chamaedaphne calyculata* изменилась незначительно, однако к четвертому месяцу изменение составило 1‰ для естественных условий и более 2‰ для Гари. Очес *Sphagnum fuscum* и Смешанный образец уже в первый месяц деструкции показали изменение изотопного состава азота более чем на 2‰ относительно исходных значений. Для Смешанного образца влияние условий мест закладки образцов в течение первого месяца менее заметно – величина $\delta^{15}\text{N}$ для двух участков изменилась

примерно одинаково. Однако к четвертому месяцу трансформации величина $\delta^{15}\text{N}$ в условиях Гари выше величины $\delta^{15}\text{N}$ Смешанного образца в естественных условиях. Для очеса *Sphagnum fuscum* влияние условий мест закладки более явно: в течение первого месяца в естественных условиях величина $\delta^{15}\text{N}$ выше, чем величина $\delta^{15}\text{N}$ в условиях Гари, однако к четвертому месяцу ситуация меняется на противоположную.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование показало, что за счет значительного количества мортмассы (2402 г/м^2) Естественный рям обладает запасом органического вещества, превышающим таковой в условиях Гари в 1,7 раз. При меньшем вкладе в продукцию фитоценоза условия постпирогенной сукцессии способствуют более активным деструкционным процессам (потери массы за 4 месяца разложения в условиях Гари – от 3,5 до 34,3%). Максимальная скорость разложения достигается в первый месяц деструкции, как в условиях ненарушенного, так и горелого болота (в среднем 59% от общих потерь за вегетационный период приходится на первый месяц деструкции). Наиболее явное влияние постпирогенной сукцессии на скорость разложения органического вещества наблюдается для растительных остатков *Chamaedaphne calyculata* и Смешанного образца. Как в условиях Естественного рьяма, так и в условиях Гари минимальные потери органического вещества свойственны *Sphagnum fuscum*. Смешивание компонентов опада оказывает влияние на скорость разложения: Смешанный образец по потерям массы занимает промежуточное положение между своими отдельными компонентами.

Потери углерода хорошо коррелируют с потерями массы как в течение первого месяца деструкции ($r=0,87$), так и за четыре месяца ($r=0,96$). В отличие от углерода, азот на начальных этапах деструкции иммобилизуется в Естественном рьяме в Смешанном образце как через один месяц, так и через четыре месяца. В условиях Гари на начальных этапах деструкции в образцах *Sphagnum fuscum* происходит значительное накопление зольных элементов. Изотопный состав углерода и азота начинает изменяться при деструкции уже на начальных этапах, происходит обогащение тяжелыми изотопами ^{13}C и ^{15}N . Данное исследование подчеркивает важность изучения процессов разложения растительного опада на начальных этапах и учета компонентного состава при изучении процессов трансформации органического вещества в экосистемах.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках научных тем: «Развитие системы мониторинга и комплексного анализа пулов и потоков парниковых газов болотных и лесных экосистем Западной Сибири», рег. № 122111400002-2, «Закономерности изменения и взаимодействия основных компонентов климатической системы Азиатской территории России», рег. № 121031300154-1.

ЛИТЕРАТУРА

- Базанов В.А., Егоров Б.А., Лыготин В.А., Скугарев А.А. Современная пространственная динамика Большого Васюганского болота (на примере междуречья Икса-Шегарка) // Большое Васюганское болото. Современное состояние и процессы развития / М.В. Кабанова (отв. ред.). Томск: Институт атмосферной оптики СО РАН, 2002. С. 190–196.
- Базилевич Н.И., Титлянова А.А. Биотический круговорот на пяти континентах: азот и зольные элементы в природных наземных экосистемах / А.А. Тишков (отв. ред.). Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. 381 с.
- Базилевич Н.И. Биологическая продуктивность экосистем Северной Евразии. Москва: Наука, 1993. 295 с.
- Боч М.С., Мазинг В.В. Экосистемы болот СССР. Ленинград: Наука, 1979. 188 с.
- Вишнякова Е.К., Миронычева-Токарева Н.П., Косых Н.П. Динамика разложения растений на болотах Васюганья // Вестник Томского государственного педагогического университета. 2012. № 7 (122). С. 88–93.
- Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных (ВНИИГМИ-МЦД) [Электронный ресурс]. URL: <http://meteo.ru/> (дата обращения 23.03.2023).
- Говоруха В.В. Использование мхов для оценки загрязнения окружающей среды ртутью // Проблемы геологии и освоения недр: труды XXI Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 130-летию со дня рождения профессора М.И. Кучина. Том I / Томский политехнический университет (Томск, 3–7 апреля 2017 г.). Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2017. С. 720–722.

- Головацкая Е.А., Никонова Л.Г. Влияние уровня болотных вод на процессы трансформации сфагновых мхов в торфяной почве олиготрофных болот // Почвоведение. 2017. № 5. С. 603–613. <https://doi.org/10.7868/80032180X17030030>
- Дашкевич Е.А., Смоляк Л.П. Закономерности сукцессионных процессов на осушенных болотах // Труды Белорусского государственного технологического университета (Труды БГТУ). №1. Лесное хозяйство. 1993. С. 92–96. URL: <https://elib.belstu.by/handle/123456789/53594> (дата обращения 10.03.2024).
- Денисенков В.П. Основы болотоведения. Санкт-Петербург: Изд-во Санкт-Петербургского университета, 2000. 224 с.
- Добровольская Т.Г. Функционирование микробных комплексов верховых торфяников – анализ причин медленной деструкции торфа / И.Ю. Чернова (отв. ред.) Москва: Товарищество научных изданий КМК, 2013. 131 с.
- Дурынина Е.П., Егоров В.С. Агрохимический анализ почв, растений, удобрений. Москва: МГУ, 1998. 113 с.
- Козловская Л.С., Медведева В.М., Пьявченко Н.И. Динамика органического вещества в процессе торфообразования. Ленинград: Наука ЛО, 1978. 172 с.
- Коронатова Н.Г. Исследование разложения торфа в болотах методом инкубации сухих и влажных образцов // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. 2010. Том 1. № 1. С. 77–84.
- Косых Н.П., Коронатова Н.Г. Запасы общей фитомассы и чистая первичная продукция болотных экосистем Сургутского Полесья // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. 2010. Том 1. № 2. С. 77–84.
- Косых Н.П., Миронычева-Токарева Н.П., Блейтен В. Продуктивность болот южной тайги Западной Сибири // Вестник Томского государственного университета. 2003. № 7. С. 142–152.
- Кудрявцев В.Л. Осушение болот в Томской области для сельского хозяйства // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 1969. Т. 178. С. 41–45.
- Лебедев А.Т. Масс-спектрометрия для анализа объектов окружающей среды. Москва: Техносфера, 2013. 632 с.
- Ляпина Е.Е. Геоэкологические особенности ртутной нагрузки на территорию Томской области по данным биомониторинговых исследований // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1–2. С. 272.
- Миронычева-Токарева Н.П., Косых Н.П., Вишнякова Е.К. Продукционно-деструкционные процессы в болотных экосистемах Васюганья // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. 2013. Том 4. № 1. С. 1–9.
- Никонов М.Н. Происхождение и состав золы торфов лесной зоны // Труды института леса АН СССР. 1955. Том 26. С. 135–152.
- Никонова Л.Г., Головацкая Е.А., Курьина И.В., Курганова И.Н. Скорость разложения растений-торфообразователей в олиготрофных болотах южно-таежной подзоны Западной Сибири: оценка влияния уровня болотных вод и температуры торфяной залежи // Почвоведение. 2019. № 9. С. 1092–1103. <https://doi.org/10.1134/S0032180X19090065>
- Никонова Л.Г., Головацкая Е.А. Оценка скорости разложения растений-торфообразователей в осушенных и пирогенных торфяниках // Envigomis-2020: избранные труды Международной конференции и школы молодых ученых по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды. Томск, (Томск, 07–11 сентября 2020 г.). Томск: Томский центр научно-технической информации, 2020. С. 227–230.
- Никонова Л.Г., Калашникова Д.А., Головацкая Е.А., Симонова Г.В. Деструкция растений-торфообразователей на начальных этапах разложения в условиях ненарушенных и постпирогенных торфяников Западной Сибири // Почвы и окружающая среда [Электронный ресурс]: Сборник научных трудов Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 55-летию Института почвоведения и агрохимии СО РАН (Новосибирск, 2–6 октября 2023 г.). Новосибирск: ИПА СО РАН, 2023. С. 790–794. <https://doi.org/10.31251/conf1-2023>
- Прокушкин С.Г., Прокушкин А.С., Сорокин Н.Д. Интенсивность разложения отдельных компонентов фитодетрита в листовничниках криолитозоны средней Сибири // Известия Российской академии наук. Серия биологическая. 2014. № 1. С. 76–85. <https://doi.org/10.7868/S0002332914010093>
- Раковский В.Е., Пигулевская Л.В. Химия и генезис торфа. Москва: Недра, 1978. 231 с.
- Титлянова А.А., Шибарева С.В., Варакина З.В. Закономерности изменения величин чистой первичной продукции в евразийских степях // Почвы и окружающая среда. 2023. Том 6. №2. e210. <https://doi.org/10.31251/pos.v6i2.210>

- Тиунов А.В. Стабильные изотопы углерода и азота в почвенно-экологических исследованиях // Известия Российской академии наук. Серия биологическая. 2007. № 4. С. 475–489.
- Трифонова Н.А., Здвижков М.А., Прейс Ю.И. Химический и микробиологический состав вод вторичных озер Иксинского болота (Южная тайга, Западная Сибирь) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2010. Том 317. № 1. С. 143–148.
- Храмов А.А., Валуцкий В.И. Лесные и болотные фитоценозы Восточного Васюганья. Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1977. 219 с.
- Berg B. Decomposition patterns for foliar litter: A theory for influencing factors // Soil Biology and Biochemistry. 2014. Vol. 78. P. 222–232. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.08.005>
- Berg B., Staaf H. Leaching, accumulation and release of nitrogen in decomposing forest litter // Ecological Bulletins. 1981. No. 33. P. 163–178.
- Filippova N.V., Glagolev M.V. Short-term standard litter decomposition across three different ecosystems in middle taiga zone of West Siberia // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018. Vol. 138. 5th International field symposium "West Siberian Peatlands and Carbon Cycle: Past and Present" and the International conference "Carbon Balance of Western Siberian Mires in the Context of Climate Change" (Khanty-Mansiysk, 19–29 June, 2017). P. 012004. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/138/1/012004>
- Fortuniak K., Pawlak W. Preliminary results of net ecosystem exchange of greenhouse gases (CO₂, CH₄, H₂O) at wetland of Biebrza National Park, Poland // Торфяники Западной Сибири и цикл углерода: прошлое и настоящее. Материалы Четвёртого Международного полевого симпозиума (Новосибирск, 04–17 августа 2014 г.) / Под редакцией А.А. Титляновой и М.И. Дергачевой. Томск: Национальный исследовательский Томский государственный университет, 2014. С. 141–143.
- Frost P.C., Evans-White M.A., Finkel Z.V., Jensen T.C., Matzek V. Are you what you eat? Physiological constraints on organismal stoichiometry in an elementally imbalanced world // Oikos. 2005. Vol. 109. No. 1. P. 18–28. <https://doi.org/10.1111/j.0030-1299.2005.14049.x>
- Hogg E.H., Lieffers V.J., Wein R.W. Potential Carbon losses from peat profiles: effects of temperature, drought cycles, and fir // Ecological Applications. 1992. Vol. 2. No. 3. P. 298–306. <https://doi.org/10.2307/1941863>
- Kosykh N.P., Koronotova N.G., Naumova N.B., Titlyanova A.A. Above- and below-ground phytomass and net primary production in boreal mire ecosystems // Wetlands ecology and management. 2008. Vol. 16. P. 139–153. <https://doi.org/10.1007/s11273-007-9061-7>
- Leavitt S.W., Chase T.N., Rajagopalan B., Lee E., Lawrence P.J. Southwestern U.S. tree-ring carbon isotope indices as a possible proxy for reconstruction of greenness of vegetation // Geophysical Research Letters. 2008. Vol. 35. No. 12. <https://doi.org/10.1029/2008GL033894>
- Nikonova L., Kurganova I., Lopes de Gerenyu V., Rogova O., Golovatskaya E. Impact of Temperature and Moisture on the Decomposition of Peat-Forming Plants: Results of a Two-Year Incubation Experiment // Forests. 2023. Vol. 14. No. 12. P. 2355. <https://doi.org/10.3390/f14122355>
- Peltoniemi K., Strakova P., Fritze H., Iraizoz P.A., Pennanen T., Laiho R. How water-level drawdown modified litter-decomposing fungal and actinobacterial communities in boreal peatlands // Soil Biology and Biochemistry. 2012. Vol. 51. P. 20–34. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.04.013>
- Prescott C. Litter decomposition: What controls it and how can we alter it to sequester more carbon in forest soils? // Biogeochemistry. 2010. Vol. 101. P. 133–149. <https://doi.org/10.1007/s10533-010-9439-0>
- Robinson D. $\delta^{15}\text{N}$ as an integrator of the nitrogen cycle // Trends in ecology & evolution. 2001. Vol. 16. No. 3. P. 153–162. [https://doi.org/10.1016/S0169-5347\(00\)02098-X](https://doi.org/10.1016/S0169-5347(00)02098-X)
- Sommers W.T., Loehman R.A., Hardy C.C. Wildland fire emissions, carbon, and climate: Science overview and knowledge needs // Forest Ecology and Management. 2014. Vol. 317. P. 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.12.014>
- Trentbath B.R., Diggle A.J. An interpretative model of carbon and nitrogen transformation applied to a residue incubation experiment // Australian journal of agricultural research. 1998. Vol. 49. No. 3. P. 537–554. <https://doi.org/10.1071/A97094>
- 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. No. 1. P. 11–14.

Поступила в редакцию 20.03.2024

Принята 29.04.2024

Опубликована 13.05.2024

Сведения об авторах:

Никонова Лилия Гарифулловна – кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории мониторинга углеродного баланса наземных экосистем ФГБУН Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (г. Томск, Россия); nikonovalilig@gmail.com

Калашникова Дарья Андреевна – кандидат химических наук, младший научный сотрудник лаборатории мониторинга углеродного баланса наземных экосистем ФГБУН Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (г. Томск, Россия); terrezaprk@mail.ru

Головацкая Евгения Александровна – доктор биологических наук, профессор РАН, директор ФГБУН Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (г. Томск, Россия); golovatskayaea@gmail.com

Симонова Галина Владимировна – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории биоинформационных технологий ФГБУН Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (г. Томск, Россия); galina_simonova@inbox.ru

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.



Статья доступна по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License

Phytomass reserves and degradation of peat-forming plants at the first stages of decomposition in natural and post-pyrogenic peatlands of West Siberia

© 2024 L. G. Nikonova , D. A. Kalashnikova , E. A. Golovatskaya , G. V. Simonova 

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia, E-mail: nikonovalilig@gmail.com

The aim of the study. Assessment of the phytomass stocks and decomposition rate of peat-forming plants' residues in peat deposits of natural and post-pyrogenic peatlands at the initial stages of decomposition.

Location and time of the study. The study was carried out in 2022 (May-September) at two oligotrophic bog sites: "Bakcharskoye" (field station "Vasyuganye", IMCES SB RAS) and "Iksinskoye", which are located in the north eastern spurs of the Great Vasyugan mire in the Bakcharsky and Shegarsky districts of the Tomsk region, Russia.

Methods. The phytomass stocks were determined by the cutting method. The following fractions were separated: living phytomass (annual and perennial photosynthetic phytomass, i.e. green parts of grasses, shrubs leaves, mosses); perennial non-photosynthetic phytomass, i.e. shrubs stems, roots of grasses and shrubs; and dead phytomass (mortmass), i.e. litter, moss litter, standing dead phytomass. The decomposition rate of plant residues was determined by the method of litter bags placement in peat (*Chamaedaphne calyculata*, *Sphagnum fuscum*, Mixed sample consisting of 60% *S. fuscum* and 40% *Ch. calyculata*). In the initial and decomposed samples, the ash content was determined by the dry combustion method. The total carbon and nitrogen content, as well as the carbon and nitrogen isotopic composition, were determined using a DELTA V Advantage isotope ratio mass spectrometer.

Results. This short-term study conducted during the growing season in conditions of undisturbed (Natural Ryam) and post-pyrogenic (Gar) phytocenoses showed that due to a significant amount of mortmass (2402 g/m²) Natural Ryam had organic matter stock exceeding that in the Gar by 1.7 times. On average, 59% of organic matter loss from the total losses during the growing season occurred in the first month. In both Gar and Natural Ryam conditions, minimal losses of organic matter were characteristic for *Sphagnum fuscum* (3.1 and 3.5% respectively). For the remaining samples the Gar conditions were more favorable for the degradation at the initial stages of decomposition. The Mixed sample occupied an intermediate position between its individual components in terms of mass losses. Carbon losses correlated well with mass losses both over 1 month of degradation ($r=0.87$) and over 4 months ($r=0.96$). In contrast to carbon, nitrogen accumulated in the Mixed sample at the initial stages of degradation, both after 1 month and 4 months.

Conclusions. With smaller phytomass stocks in areas of post-pyrogenic succession, more active decay at the initial stages of organic matter decomposition occurs exactly under these conditions. The impact of post-pyrogenic succession on the rate of organic matter decomposition of *Chamaedaphne calyculata* plant residues and the Mixed sample was demonstrated. The most intensive decomposition of litter occurred during the first month of degradation. Additionally, in the conditions of a burnt bog, a more intense release of nitrogen from all plant residues and accumulation of ash elements in *Sphagnum fuscum* samples were observed. The mixing of

litter components influenced both the rate and dynamics of decomposition. The carbon and nitrogen isotopic composition began to change during the initial stages of decomposition, leading to enrichment with heavier isotopes ^{15}N and ^{13}C . This research emphasizes the importance of studying the processes of plant litter decomposition at the initial stages and considering the plant residue composition when studying the processes of organic matter transformation.

Keywords: peat oligotrophic soils; Histosols; *Sphagnum fuscum*; *Chamaedaphne calyculata*; organic matter decomposition; nitrogen and carbon isotopic composition ($\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{13}\text{C}$); post-pyrogenic peatlands.

How to cite: Nikonova L.G., Kalashnikova D.A., Golovatskaya E.A., Simonova G.V. Phytomass reserves and degradation of peat-forming plants at the first stages of decomposition in natural and post-pyrogenic peatlands of West Siberia. *The Journal of Soils and Environment*. 2024. 6(X). e258 (in Russian with English abstract). DOI: [10.31251/pos.v7i2.258](https://doi.org/10.31251/pos.v7i2.258)

FUNDING

The study was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation by the Projects "Development of a system for monitoring and integrated analysis of pools and flows of greenhouse gases in wetland and forest ecosystems of West Siberia" (No. 122111400002-2), and "Regularities of change and interaction of the main components of the climatic system of the Asian territory of Russia" (No. 121031300154-1).

REFERENCES

- Bazanov V.A., Egorov B.A., L'gotin V.A., Skugarev A.A. Modern spatial dynamics of the Great Vasyugan Mire (the case of the Iksa-Shegarka interfluve). In book: *The Great Vasyugan Mire Current status and development processes* / M.V. Kabanov (ed.). Tomsk: Institute of Atmospheric Optics SB RAN, 2002. P. 190–196. (in Russian).
- Bazilevich N.I., Titlyanova A.A. Biotic turnover of five continents: element exchange processes in terrestrial natural ecosystems / A.A. Tishkov (ed.). Novosibirsk: Publishing House SB RAS, 2008. 381 p. (in Russian).
- Bazilevich N.I. Biological stability of the ecosystem of Northern Eurasia. Moscow: Nauka Publ., 1993. 295 p. (in Russian).
- Boch M.S., Mazing V.V. *Ecosystems of marshes of the USSR*. Leningrad: Nauka Publ., 1979. 188 p. (in Russian).
- Vishnyakova E.K., Mironycheva-Tokareva N.P., Kosykh N.P. Decomposition Dynamics of Plants of Bogs (Data: Vasyugan Bog). *Tomsk State Pedagogical University Bulletin*. 2012. No. 7. P. 88–93. (in Russian).
- Russian Institute of Hydrometeorological Information – World Data Center (RIHMI – WDC). URL: <http://meteo.ru/> (accessed on 23.03.2023). (in Russian).
- Govorukha V.V. Use of mosses for assessment of environmental pollution by mercury. In book: *Problems of Geology and Subsurface Development. Proceedings of the 21th International Scientific Symposium of students, Postgraduates and young Scientists devoted to the 130th Anniversary of birth of M. Kuchin. Part I* / Tomsk Polytechnic University (Tomsk, 3–7 April, 2017). Tomsk: Polytechnic University Publishing House, 2017. P. 720–722. (in Russian).
- Golovatskaya E.A., Nikonova L.G. The influence of the bog water level on the transformation of sphagnum mosses in peat soils of oligotrophic bogs. *Eurasian Soil Science*. 2017. Vol. 50. No. 5. P. 580–588. <https://doi.org/10.1134/S1064229317030036>
- Dashkevich E.A., Smolyak L.P. Patterns of successional processes on the drained bogs. *Proceedings of Belarusian State Technological University (Proceedings of BSTU)*. No. 1. Forestry. 1993. P. 92–96. URL: <https://elib.belstu.by/handle/123456789/53594> (accessed on 10.03.2024). (in Belarus).
- Denisenkov V.P. *Basics of Swamp Science*. St. Petersburg: St. Petersburg University Publ., 2000. 224 p. (in Russian).
- Dobrovolskaya T.G., Golovchenko A.V., Zvyagintsev D.G. Functions of Microbial Complexes of the High-Moor Peatbogs: Reasons for Slow Peat Destruction / I.Y. Chernov (ed.). Moscow: KMK Publ., 2013. 131 p. (in Russian).
- Durygina E.P., Egorov V.S. *Agrochemical analysis of soils, plants, fertilizers*. Moscow: MSU Publ., 1998. 113 p. (in Russian).
- Kozlovskaya L.S., Medvedeva V.M., Piavchenko N.I. Dynamics of organic matter in the process of peat formation. Leningrad: Nauka LO Publ., 1978. 172 p. (in Russian).
- Koronatova N.G. Investigation of peat decomposition in bogs by method of dry and wet samples incubation. *Environmental Dynamics and Global Climate Change*. 2010. Vol. 1. No. 1. P. 77–84. (in Russian).
- Kosykh N.P., Koronatova N.G. Phytomass and primary production of mire ecosystems in Surgut Polesie. *Environmental Dynamics and Global Climate Change*. 2010. Vol. 1. No. 2. P. 77–84. (in Russian).

- Kosykh N.P., Mironycheva-Tokareva N.P., Bleyten V. Productivity of peatlands in South taiga of West Siberia. Tomsk State University Journal. 2003. No. 7. P. 142–152. (in Russian).
- Kudryavtsev V.L. Draining of marshes in the Tomsk region for agriculture. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. 1969. Vol. 178. P. 41–45. (in Russian).
- Lebedev A.T. Mass Spectrometry for the Analysis of the Environment. Moscow: Tekhnosfer Publ., 2013. 632 p. (in Russian).
- Lyapina E.E. Geocological features of mercury load of the territory of the Tomsk region according to biomonitoring research. Modern problems of science and education. 2015. Vol. 1–2. P. 272. (in Russian).
- Mironycheva-Tokareva N.P., Kosykh N.P., Vishnykova E.K. Production and destruction processes in peatland ecosystems of Vasyugan region. Environmental Dynamics and Global Climate Change. 2013. Vol. 4. No. 1. P. 1–9. (in Russian).
- Nikonova M.N. Origin and composition of forest zone peat ashes. Proceedings of the Institute of Forestry of the USSR Academy of Sciences. 1955. Vol. 26. P. 135–152. (in Russian).
- Nikonova L.G., Golovatskaya E.A., Kur'ina I.V., Kurganova I.N. Decomposition rate of peat-forming plants in oligotrophic bogs of the southern taiga subzone of Western Siberia: assessment of the effect of water table level and peat deposit temperature. Eurasian Soil Science. 2019. Vol. 52. No. 9. P. 1101–1111. <https://doi.org/10.1134/S1064229319090060>
- Nikonova L.G., Golovatskaya E.A. Estimate of the decomposition rate of peat-forming plants in drained and pyrogenic peatlands. In book: Enviromis-2020. Selected Proceedings of the International Conference and School of Young Scientists on Measurements, Modeling and Information Systems for Environmental Studies. Tomsk, (Tomsk, 07–11 September, 2020). Tomsk: Tomsk Center for Scientific and Technical Information, 2020. P. 227–230. (in Russian).
- Nikonova L.G., Kalashnikova D.A., Golovatskaya E.A., Simonova G.V. Degradation of peat-forming plants at the first stages of decomposition in natural and post-pyrogenic peatlands of Western Siberia. In book: Soils and Environment [Electronic resource]: Collection of scientific papers of the All-Russian scientific conference with international participation, dedicated to the 55th anniversary of the Institute of Soil Science and Agrochemistry SB RAS (Novosibirsk, October 2–6, 2023). Novosibirsk: SSA SB RAS, 2023. P. 790–794. (in Russian). <https://doi.org/10.31251/conf1-2023>
- Prokushkin S.G., Prokushkin A.S., Sorokin N.D. The intensity of phytodetrite decomposition in larch forest of the permafrost zone in Central Siberia. Biology Bulletin. 2014. Vol. 41. No. 1. P. 89–97. <https://doi.org/10.1134/S1062359014010075>
- Rakovskiy V.E., Pigulevskaya L.V. Chemistry and genesis of peat. Moscow: Nedra Publ., 1978. 231 p. (in Russian).
- Titlyanova A.A., Shibareva S.V., Varakina Z.V. Patterns of net primary production changes in eurasian steppes. The Journal of Soils and Environment. 2023. Vol. 6. No. 2. e210. (in Russian). <https://doi.org/10.31251/pos.v6i2.210>
- Tiunov A.V. Stable isotopes of carbon and nitrogen in soil ecological studies. Biology Bulletin. 2007. Vol. 34. P. 395–407. <https://doi.org/10.1134/S1062359007040127>
- Trifonova N.A., Zdvizhkov M.A., Preis Y.I. Chemical and microbiological composition of water in secondary lakes of the Iksinsky bog (Southern taiga, Western Siberia). Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. 2010. Vol. 317. No. 1. P. 143–148. (in Russian).
- Khramov A.A., Valutskii V.I. Forest and swamp plant communities of the Eastern Vasyugan land. Novosibirsk: Nauka Publ., Siberian Branch, 1977. 222 p. (in Russian).
- Berg B. Decomposition patterns for foliar litter: A theory for influencing factors. Soil Biology and Biochemistry. 2014. Vol. 78. P. 222–232. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.08.005>
- Berg B., Staaf H. Leaching, accumulation and release of nitrogen in decomposing forest litter. Ecological Bulletins. 1981. No. 33. P. 163–178.
- Filippova N.V., Glagolev M.V. Short-term standard litter decomposition across three different ecosystems in middle taiga zone of West Siberia. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018. Vol. 138. 5th International field symposium "West Siberian Peatlands and Carbon Cycle: Past and Present" and the International conference "Carbon Balance of Western Siberian Mires in the Context of Climate Change" (Khanty-Mansiysk, 19–29 June, 2017). P. 012004. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/138/1/012004>
- Fortuniak K., Pawlak W. Preliminary results of net ecosystem exchange of greenhouse gases (CO₂, CH₄, H₂O) at wetland of Biebrza National Park, Poland. In book: West Siberian Peatlands and Carbon Cycle: past and present. Proceedings of the Fourth International Field Symposium (Novosibirsk, 04–17 August, 2014) / Edited by A.A. Titlyanova and M.I. Dergacheva. Tomsk: National Research Tomsk State University, 2014. C. 141–143.

- Frost P.C., Evans-White M.A., Finkel Z.V., Jensen T.C., Matzek V. Are you what you eat? Physiological constraints on organismal stoichiometry in an elementally imbalanced world. *Oikos*. 2005. Vol. 109. No. 1. P. 18–28. <https://doi.org/10.1111/j.0030-1299.2005.14049.x>
- Hogg E.H., Lieffers V.J., Wein R.W. Potential Carbon losses from peat profiles: effects of temperature, drought cycles, and fire. *Ecological Applications*. 1992. Vol. 2. No. 3. P. 298–306. <https://doi.org/10.2307/1941863>
- Kosykh N.P., Koronatova N.G., Naumova N.B., Titlyanova A.A. Above- and below-ground phytomass and net primary production in boreal mire ecosystems. *Wetlands ecology and management*. 2008. Vol. 16. P. 139–153. <https://doi.org/10.1007/s11273-007-9061-7>
- Leavitt S.W., Chase T.N., Rajagopalan B., Lee E., Lawrence P.J. Southwestern U.S. tree-ring carbon isotope indices as a possible proxy for reconstruction of greenness of vegetation. *Geophysical Research Letters*. 2008. Vol. 35. No. 12. <https://doi.org/10.1029/2008GL033894>
- Nikonova L., Kurganova I., Lopes de Gerenyu V., Rogova O., Golovatskaya E. Impact of Temperature and Moisture on the Decomposition of Peat-Forming Plants: Results of a Two-Year Incubation Experiment. *Forests*. 2023. Vol. 14. No. 12. P. 2355. <https://doi.org/10.3390/f14122355>
- Peltoniemi K., Strakova P., Fritze H., Iraizoz P.A., Pennanen T., Laiho R. How water-level drawdown modified litter-decomposing fungal and actinobacterial communities in boreal peatlands. *Soil Biology and Biochemistry*. 2012. Vol. 51. P. 20–34. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.04.013>
- Prescott C. Litter decomposition: What controls it and how can we alter it to sequester more carbon in forest soils? *Biogeochemistry*. 2010. Vol. 101. P. 133–149. <https://doi.org/10.1007/s10533-010-9439-0>
- Robinson D. $\delta^{15}\text{N}$ as an integrator of the nitrogen cycle. *Trends in ecology & evolution*. 2001. Vol. 16. No. 3. P. 153–162. [https://doi.org/10.1016/S0169-5347\(00\)02098-X](https://doi.org/10.1016/S0169-5347(00)02098-X)
- Sommers W.T., Loehman R.A., Hardy C.C. Wildland fire emissions, carbon, and climate: Science overview and knowledge needs. *Forest Ecology and Management*. 2014. Vol. 317. P. 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.12.014>
- Trentbath B.R., Diggle A.J. An interpretative model of carbon and nitrogen transformation applied to a residue incubation experiment. *Australian journal of agricultural research*. 1998. Vol. 49. No. 3. P. 537–554. <https://doi.org/10.1071/A97094>
- 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. No. 1. P. 11–14.

Received 20 March 2024

Accepted 29 April 2024

Published 13 May 2024

About the authors:

Liliya G. Nikonova – Candidate of Biological Sciences, Researcher in the Laboratory for Monitoring the Carbon Balance of Terrestrial Ecosystems, Institute for Monitoring Climatic and Ecological Systems, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russia); nikonovalilig@gmail.com

Daria A. Kalashnikova – Candidate of Chemical Sciences, Junior Researcher in the Laboratory for Monitoring the Carbon Balance of Terrestrial Ecosystems, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russia); terrezapr@mail.ru

Evgeniya A. Golovatskaya – Doctor of Biological Sciences, Professor of the Russian Academy of Sciences, Director, Institute for Monitoring Climatic and Ecological Systems, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russia); golovatskayaea@gmail.com

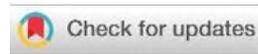
Galina V. Simonova – Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher in the Laboratory of Bioinformation Technologies, Institute for Monitoring of Climatic and Ecological Systems, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russia); galina_simonova@inbox.ru

The authors read and approved the final manuscript



The article is available under [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

УДК 631.42: 633.9

<https://doi.org/10.31251/pos.v7i2.247>

Адаптационный потенциал культуры *Miscanthus* в условиях солонцового агроландшафта

© 2024 Н. И. Добротворская ¹, С. Ю. Капустянчик ²

¹ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий», ул. Плеханова, 10, г. Новосибирск, 630054, Россия. E-mail: dobrotvorskaya@mail.ru

²Сибирский научно-исследовательский институт растениеводства и селекции – филиал ИЦиГ СО РАН, ул. С-200, зд. 5/1, а/я 375, Новосибирская обл., р.п. Крснообск, 630501, Россия. E-mail: kapustyanchik@bionet.nsc.ru

Цель исследования. В статье рассмотрена экологическая адаптивность *Miscanthus* сорта Сорановский к засоленным агроландшафтам и его фитомелиоративное влияние на засоленные почвы.

Место и время проведения. Экспериментальная часть исследований выполнена в центрально-лесостепном Барабинском агроландшафтном районе (Научная экспериментальная база Сибирского федерального центра агробиотехнологий СО РАН) в 2018–2020 гг.

Методы. В исследовании использованы методы полевого и вегетационного опыта, химического анализа почв и растительных образцов по общепринятым методикам, статистической обработки данных по Доспехову с использованием методики ВНИИ кормов.

Основные результаты. Исследования показали, что *Miscanthus* может произрастать на солонцовых почвах, обеспечивая урожай биомассы до 5 т/га при засушливых условиях вегетационного периода. Отчуждение из почвы питательных элементов биомассой стеблей *Miscanthus* является невысоким (азота – 8,2, фосфора – 1,4, калия – 9,7 кг/га в год) вследствие ежегодной реутилизации их в корневища, что позволяет избежать опасности истощения почв при многолетнем выращивании культуры. Выращивание *Miscanthus* на лугово-чернозёмном солонце в течение трёх лет привело к изменению свойств почвы: снижению pH; изменению химизма солей в почвенном растворе, проявляющемся в снижении содержания соды.

Заключение. Результаты проведённых исследований показали, что культура *Miscanthus* обладает широкими адаптационными возможностями применительно к малоплодородным землям солонцовой зоны Западной Сибири. Посадки *Miscanthus* оказывают благоприятное средообразующее влияние на солонцовые почвы, благодаря обогащению почв элементами минерального питания и улучшению их химических свойств.

Ключевые слова: *Miscanthus*; солеустойчивость; солонцовые почвы; биомасса; элементы минерального питания.

Цитирование: Добротворская Н.И., Капустянчик С.Ю. Адаптационный потенциал культуры *Miscanthus* в условиях солонцового агроландшафта // Почвы и окружающая среда. 2024. Том 7. № 2. e247. DOI: [10.31251/pos.v7i2.247](https://doi.org/10.31251/pos.v7i2.247)

ВВЕДЕНИЕ

Солеустойчивость растений – актуальная проблема в растениеводстве. Необходимость её изучения связана с наличием больших площадей засоленных почв, включая солонцы, не только в России, но и во многих странах (Zheng et al., 2022). В России солонцовые комплексы сосредоточены в семи экономических районах (Центрально-Черноземном, Поволжском, Северо-Кавказском, Уральском, Западно-Сибирском, Восточно-Сибирском и Дальневосточном) и 37 административных областях. Наибольшую площадь почвы солонцовых комплексов занимают в Волгоградской области, Калмыкии, Курганской и Новосибирской областях (Панов, 2008).

На территории юга Западной Сибири наибольшее распространение солонцовые агроландшафты получили в Барабинской равнине, как результат специфической истории почвообразования, связанной с трансгрессией моря в третичном периоде и аккумуляцией толщи засоленных глин, являющихся в настоящее время одним из факторов формирования засоленных ландшафтов. Общая их площадь в Новосибирской области составляет 3686,2 тыс. га. В отдельных административных районах на их долю приходится более 70% территории (Каргатский, Доволенский, Чановский, Карасукский, Купинский, Чистоозерный). Несмотря на огромные площади, они обеспечивают всего 20–25% всех потребностей животноводства в кормах, что, прежде всего, связано с низкой продуктивностью естественных фитоценозов (1,0–3,0 ц/га сухой массы в степи и 3,0–5,0 ц/га в лесостепи) (Константинов, Ломова, 2007).

Основным приёмом борьбы с засолением почв является применение мелиоративных и агротехнических мероприятий, улучшающих физико-химические и биологические свойства почв. Большое внимание должно быть уделено не только изменению свойств почв, но и биологическим свойствам растений, повышению их солеустойчивости. Изучение солеустойчивости растений начато ещё в середине XX века работами Б.П. Строгонова, П.А. Генкеля, Г.Р. Матухина. Известно, что злаковые и бобовые соле- и солонцеустойчивые растения способны рассолить засоленные почвы. В частности, на солонцовых почвах с помощью жизнедеятельности растений можно создать условия, приводящие к образованию зональной почвы. Это достигается путём доминирования процессов биологической фитомелиорации над процессами засоления. Такая биологическая трансформация в условиях Западной Сибири приводит к образованию лугово-чернозёмных почв различной степени солонцеватости и солончаковатости (Орловский, 1937). При смене растительности может изменяться и почвенный покров. Например, переход от солянок и полыней на солонцах к бобовым и злаковым травам сопровождается перераспределением в почвенном профиле солей и зольных химических элементов, в частности кальция. Накопление кальция в верхних горизонтах почвы неизбежно ведёт к вытеснению натрия из почвенного поглощающего комплекса и рассолению солонцов – этот процесс В.А. Ковда (1973) назвал «остепнением». Процесс остепнения солонцов в естественных условиях может длиться веками, а в искусственных – сокращается до нескольких лет (Орловский, 1946). Выращивание солевыносливых и натриефильных культурных растений рекомендуется исследователями для осуществления фитомелиорации засоленных агроландшафтов (Константинов, Ломова, 2007). Таким образом, для рассоления солонцовых почв нужно активизировать процесс биологической трансформации, правильно подобрав культуры, которые должны обладать следующими качествами: быть соле- и засухоустойчивыми, а также активно участвовать в процессах биологической аккумуляции питательных элементов.

Miscanthus sacchariflorus известен как многолетняя злаковая культура, выращиваемая для технических и энергетических целей. Большой объём ежегодно производимой биомассы, особенности биологического круговорота зольных химических элементов, углерода и азота ставят эту культуру в ряд перспективных в стратегии экологизации растениеводства и земледелия. Сегодня как никогда актуальны исследования по оценке современного потенциала наземных экосистем депонировать углерод, а также разработка научно-обоснованных мер по увеличению углеродпоглощающей ёмкости основных резервуаров биогенного цикла углерода (Нечаева, 2023). Количество использования углекислого газа из атмосферы и накопления углерода в посадках таких культур, как *Miscanthus*, составляет 0,9–2,2 г С/кг почвы в год, что соответствует показателям на многолетних пастбищах (Emmerling, Pude, 2017).

Органическое вещество почвы играет большую роль в обеспечении плодородия почвы, поскольку оно выполняет жизненно важные функции экосистемы, такие как формирование структуры почвы и водоудерживающей способности, аккумуляцию питательных веществ (Schmidt et al., 2011). Зарубежными исследователями сообщалось, что выращивание *Miscanthus* может увеличить запасы органического углерода в почве на различных маргинальных землях, включая деградированные пастбища и заброшенные сельскохозяйственные угодья (Chen et al., 2020; Zhao C. et al., 2020; Xu et al., 2021).

Что касается адаптации культуры к природным условиям, то многие исследователи считают данную культуру способной производить высокую биомассу в различных по климатическим условиям регионах, делая ее идеальной в качестве возобновляемых источников энергии (McCalmont et al., 2017; Kalinina et al., 2017). В настоящее время основные площади посадок этого растения расположены преимущественно в странах со среднегодовой температурой воздуха выше +5 ...+10 °С и суммой осадков за год не менее 600 мм (Северная Америка, Европа). Отличительная особенность *M. saccharifloru* сорта Сорановский – образование очень длинных корневищ, быстро колонизирующих свободное пространство. В результате за короткий период формируется сплошная ровная плантация, успешно конкурирующая с сорной растительностью. Как многолетнее растение со специфической корневой системой, способное произрастать длительное время на низко продуктивных землях, обеспечивая более высокую экономическую отдачу от используемых угодий, данный вид мог бы применяться в качестве фитомелиорирующей культуры наряду с такими известными фитомелиорантами как донник, люцерна, суданская трава. В масштабах России, оценка перспективности возделывания *M. sacchariflorus* и его средоулучшающих свойств на солонцовых почвах позволит расширить зону его выращивания.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальная часть исследований выполнена на опытном участке научной экспериментальной базы Сибирского федерального центра агроботехнологий СО РАН, расположенной в центрально-лесостепном Барабинском агроландшафтном районе (55°23'17,3" с.ш., 76°55'37,7" в.д.) согласно районированию СибНИИЗХим (Адаптивно-ландшафтные системы..., 2002). Центрально-лесостепной Барабинский агроландшафтный район характеризуется малосолонцовыми землями на плоских слабодренированных равнинах с преобладанием тяжёлосуглинистых и глинистых лугово-чернозёмных, чернозёмно-луговых солонцеватых почв (Gleyic Chernozems (Oligonatric)) и чернозёмов обыкновенных солонцеватых (Calcic Chernozems (Oligonatric)). Следует отметить, что ресурсы теплообеспеченности и увлажнения значительно изменяются от года к году. Это проявляется в виде различных типов увлажнения вегетационных периодов (табл. 1).

Таблица 1

Агроклиматическая характеристика и пространственно-временная изменчивость ресурсов увлажнения центрально-лесостепного Барабинского агроландшафтного района

Тип увлажнения	Среднегодовое параметры увлажнения			Коэффициент увлажнения (K_y)	Повторяемость лет с типом увлажнения, %
	$\sum t > 10^\circ$	Осадки по периодам, мм			
		O_{09-08} (Год)	O_{05-08}		
Умеренно переувлажненный	<1630	>500	>260	>1,27	15
Умеренно увлажненный	1630-1770	380-400	210-260	1,0-1,27	25
Умеренно дефицитный	1770-1860	330-380	180-210	0,79-1,00	20
Дефицитный	1860-2060	270-330	140-180	0,58-0,79	25
Острозасушливый	2060-2160	<270	<140	<0,58	15

Примечание.

$\sum t > 10^\circ$ – сумма температур выше 10 °С. O_{09-08} , O_{05-08} – сумма осадков за соответствующие месяцы, мм. $K_y = O / 0,177 \sum t > 0^\circ$ – отношение годовых осадков к произведению суммы температур выше 0° и эмпирического коэффициента испаряемости 0,177 (Понько, 2012).

Экспериментальный участок находится в южной части Барабинской низменности на территории Причановской эрозивно-аккумулятивной равнины. По данным АМС «Чаны» гидротермические условия лет исследования (2018–2020 гг.) были контрастными (рис. 1).

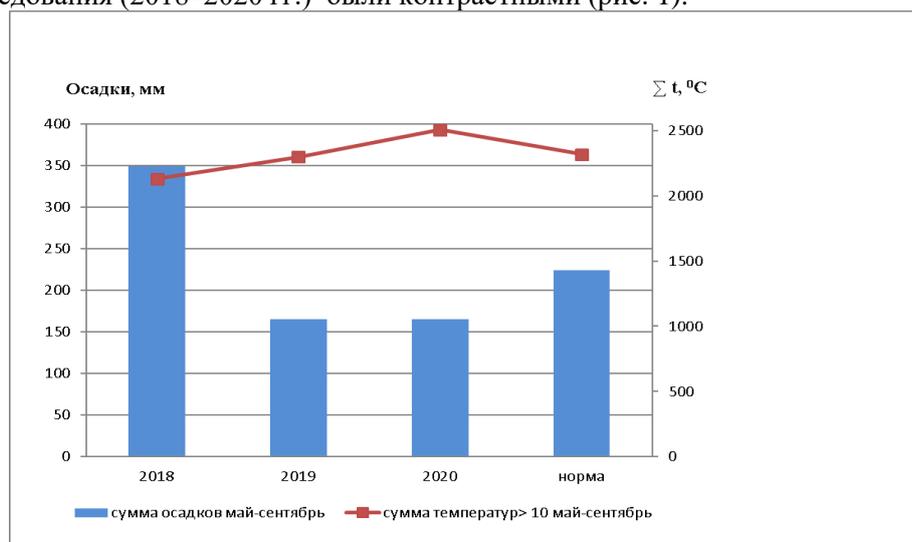


Рисунок 1. Агрометеорологическая характеристика вегетационного периода лет исследований.

Годовая сумма осадков имела следующие значения: 2018 г. – 526 мм, 2019 г. – 324 мм, 2020 г. – 340 мм при среднегодовом норме 385 мм. В условиях континентального климата для развития растений важно распределение осадков в течение вегетационного периода. По данным АМС в вегетационные периоды (май – сентябрь) в 2018, 2019 и 2020 гг. сумма осадков составила 349, 165 и

165 мм, сумма температур 2132, 2299, 2506 °С, соответственно, при среднемноголетних значениях 224 мм и 2319 °С (см. рис. 1).

Несмотря на дефицитное количество осадков в феврале и декабре 2018 года, вегетационный период характеризовался благоприятными условиями по увлажнению: в мае и августе 2018 г. отмечено 75 и 114 мм. Напротив, в мае-августе 2019 и 2020 годов количество осадков было существенно ниже нормы (за исключением июня). Анализ гидротермического коэффициента (ГТК) за вегетационный период показал, что 2018 г. (ГТК₀₅₋₀₉ составляет 0,9) был увлажненным, а 2019 и 2020 гг. (ГТК₀₅₋₀₉ составляет 0,4) следует отнести к остродефицитным. Это обстоятельство позволило наблюдать особенности развития *M. sacchariflorus* сорта Сорановский в нормальных и экстремальных метеоусловиях.

Почвенный покров территории проведения исследований характеризуется господством комплексов луговых солонцов (Gleyic Solonetz), луговых и лугово-чернозёмных солонцеватых (Gleyic Chernozems (OligoNatric)) почв, преимущественно тяжёлосуглинистых и глинистых (Siltic Clayic Loamic), приуроченных к широким межгрядным пространствам. На редких гривах почвенный покров представлен чернозёмами обыкновенными среднемоющими среднегумусными (Calcic Chernozems) более легкого гранулометрического состава.

Опыт с *M. sacchariflorus* проведён на территории опытного участка Института СибНИИКормов, заложенного в 1987 году для изучения влияния агротехнических приёмов на продуктивность естественных кормовых угодий и плодородие почв. Морфологическое описание почвы приводится по данным Реестра длительных стационарных ... (2009).

Характеристика почвы опытного участка: солонец лугово-чернозёмный содово-сульфатный средний (Gleyic Solonetz (Clayic)) тяжёлосуглинистый; мощность гумусового горизонта составила 16–18 см, глубина вскипания карбонатов от 10% HCl – 34 см, глубина залегания грунтовых вод – 4 м.

A	0–16 см	Тёмно-серый, рыхлый, комковато-зернистая структура, влажный, корни растений, тяжёлосуглинистый;
B ₁	16–34 см	Тёмно-серый, буроватый оттенок, неоднородно окрашенный, пятна оржавлений, столбчато-ореховатая структура, глянec на гранях структурных отдельностей, единичные крупные корни растений;
B ₂	34–54 см	Серый с переходом в бурый, неоднородный, значительные вкрапления оржавлений, плотный, ореховатая структура, глянec на гранях, влажный, глинистый;
B ₃	54–59 см	Грязно-бурый, неоднородный, значительные пятна карбонатов и ржавчины, плотный, влажный;
BC	59–81 см	Серо-бурый с грязными гумусовыми подтеками, ржавые прикорневые конкреции, оглеение, влажный, плотный, глинистый;
C	81–100 см	Буровато-жёлтый, карбонатный, свежий, плотный.

Агрохимическая характеристика исходного состояния почвы участка приводится также по данным Реестра длительных стационарных ... (2009), дополненным данными М.Д. Константинова и М.А. Кухарь (2007) (табл. 2).

Таблица 2

Агрохимическая характеристика солонца лугово-чернозёмного содово-сульфатного среднего (Gleyic Solonetz (Clayic))

Показатели	Слой почвы	
	0–20	20–40
Гумус, %	6,0	–
pH _{H2O}	6,2	8,4
S, ммоль/100 г почвы	24,6	21,6
P ₂ O ₅ подв, мг/кг почвы по Мачигину	60–80	
K ₂ O _{обм.} , мг/кг почвы по Мачигину	40–50	
Обменный натрий, % от суммы поглощённых оснований	28,5	34,4
Плотный остаток, %	0,129	0,224

Примечание.

Прочерк в таблице означает отсутствие данных.

Как видно из данных в таблице 2, содержание питательных элементов в почве среднее, реакция почвенного раствора в верхнем слое почвы нейтральная.

Опыт заложен в четырёхкратной повторности, размер каждой делянки 2,5×5,0 метров, дорожки между делянками – 0,7 м. Количество рядков на делянке – 4, расстояние между рядками 50 см. Общая площадь опытного участка 64 м².

Цель опыта – оценить экологическую адаптивность *M. sacchariflorus* сорта Сорановский к засоленным агроландшафтам и его фитомелиоративное влияние на засоленные почвы.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

1. Изучить продуктивность *M. sacchariflorus* на засоленных (солонцовых) почвах.
2. Выявить влияние *M. sacchariflorus* на обеспеченность почв элементами минерального питания.
3. Выявить фитомелиорирующее влияние *M. sacchariflorus* на свойства солонцовых почв.

Наблюдаемые параметры: морфологические признаки (длина генеративного побега, густота стеблестоя) и продуктивность надземной и подземной биомассы; динамика содержания элементов минерального питания в почве агроценоза *M. sacchariflorus* по годам исследований; содержание в почве обменного натрия, водорастворимых солей, щелочность почвенного раствора.

Методика проведения наблюдений. Ежегодно весной (в мае) и осенью (в конце сентября – начале октября) отбирали почвенные образцы из слоя 0–20 см массой 200 г в двух повторностях на содержание подвижных форм NPK. Ежегодно в конце вегетации проводили отбор биомассы с каждого варианта для структурного анализа и оценки химического состава растений по содержанию азота, фосфора, калия и натрия. Площадь учетной делянки составила 0,25 м² в четырёх повторностях. Содержание обменного натрия определяли по ГОСТ 26950; легкорастворимые соли (карбонаты и бикарбонаты) – по ГОСТ 26424, хлорид-ионы – по ГОСТ 26425, сульфат-ионы – по ГОСТ 26426, обменные кальций и магний – по ГОСТ 26428; pH почвенного раствора в водной вытяжке – по ГОСТ 26423. Содержание нитратного азота в почве определяли по ГОСТ 26951-86, подвижный фосфор и обменный калий извлекали 0,5 М раствором уксусной кислоты по Чирикову в модификации ЦИНАО. Оценку результатов опытов проводили согласно методическим рекомендациям Б.А. Доспехова (1985), а также методике ВНИИ кормов (Методические указания..., 2007).

Кроме того, был заложен вегетационный опыт по выявлению отношения культуры к различным уровням засоления почв и величине pH. **Цель опыта** – провести сравнительную оценку почвенного потенциала для интродукции *M. sacchariflorus* в засоленные агроландшафты.

Задачи опыта:

1. Оценить развитие растений на различных по степени засоления почвах;
2. Определить накопление элементов NPK и Na в побегах и корневищах растений;
3. Оценить изменение содержания нитратного азота, подвижных форм фосфора и обменного калия в почве под растениями *M. sacchariflorus*.

Наблюдаемые параметры: 1. В растениях – динамика количества и длины побегов; масса растений (надземная и подземная части) в конце вегетации; содержание минеральных элементов (NPK) в надземной и подземной биомассе в конце вегетации; 2. В почве – содержание и состав водорастворимых солей в водной вытяжке до и после вегетации мискантуса, содержание гумуса по И.В. Тюрину и обменных катионов.

Схема опыта включала в себя следующие варианты:

1. Лугово-чернозёмная слабосолонцеватая почва (Gleyic Chernozems (Oligonatric)) (центральная Бараба) – (контроль);
2. Солонец лугово-чернозёмный глубокий (Gleyic Solonetz (Humic)) (центральная Бараба);
3. Солонец лугово-чернозёмный корковый (Gleyic Solonetz (Ochric, Sodic)) (центральная Бараба);
4. Аллювиальная слоистая слаборазвитая солончаковая почва (Episalic Fluvisols (Alcalic, Sodic)) (Причановская депрессия);
5. Лугово-болотная солончаковая почва (Episalic Mollic Gleysols (Alcalic, Sodic)) (Причановская депрессия).

Почвы характеризуются существенным различием физико-химических свойств (табл. 3).

Методика проведения вегетационного опыта. Почву отбирали из верхнего корнеобитаемого слоя 0-20 см почвенных разрезов. Отобранную почву просеивали через сито с диаметром ячеек 7 мм. В вегетационные сосуды объёмом 10 л насыпали на дно в качестве дренажа керамзит (1 кг с диаметром гранул 1,5 см), далее дренаж закрывали марлей, сверху засыпали просеянный и прокаленный речной песок (1 кг), снова закрывали марлей, далее засыпали почву (3 кг сухого веса). Затем почву увлажняли

до влажности 60% от наименьшей влагоёмкости. В подготовленные сосуды высаживали ризомы *M. sacchariflorus* (3 шт. на сосуд, длина каждой ризомы составила 10 см).

Таблица 3

Физико-химические свойства почв вегетационного опыта

Горизонт	Глубина, см	Физическая глина, %	Гумус, %	pH _{вод}	Сухой остаток, %	Обменный Na	Сумма ПО*	Na, % от суммы ПО
						мг-экв./100 г почвы		
Лугово-чернозёмная слабосолонцеватая (Gleyic Chernozems (Oligonatric))								
Апах+А ₁	0–30	46,2	6,90	7,0	0,093	0,83	34,6	2,39
Солонец лугово-чернозёмный глубокий (Gleyic Solonetz (Humic))								
Апах+А ₁	0–20	51,6	4,72	7,15	0,077	0,02	21,8	0,09
Солонец лугово-чернозёмный корковый (Gleyic Solonetz (Ochric, Sodic))								
Апах+В ₁	0–20	53,8	5,0	8,2	0,300	5,10	20,01	25,49
Аллювиальная слоистая слабообразованная солончаковая (Episalic Fluvisol (Alcalic, Sodic))								
А ₁ g	0–20	63,5	3,25	9,0	1,460	12,1	41,0	29,51
Лугово-болотная солончаковая (Episalic Mollic Gleysols (Alcalic, Sodic))								
А ₁ g	0–20	80,1	4,30	8,9	1,304	6,75	33,7	20,03

Примечание.

*ПО – поглощённые основания (здесь и далее в табл. 7).

Опыт проводили в четырехкратной повторности. Полив сосудов осуществляли один раз в три дня. Выращивание растений проводили в условиях теплицы при температуре 22–28 / 18–22 °С при естественном освещении. По окончании культивирования растений через 5 месяцев их извлекали из сосудов. Надземную биомассу, корневища и корни разделяли. Вегетационный опыт проводили по методике З.И. Журбицкого (1968).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Оценка продуктивности *M. sacchariflorus* при выращивании на солонцеватой почве. Посадка плантации *M. sacchariflorus* была проведена 2 июня 2018 г. Благодаря обеспеченности осадками в июне, массовые всходы появились через 20 дней от даты посадки. Достаточное увлажнение (54–56 мм осадков) и благоприятные температуры (17–18 °С) в начале вегетационного периода способствовали хорошему приросту биомассы в первый год вегетации, которая составила 0,7 т/га (табл. 4).

Таблица 4

Морфологические признаки и продуктивность биомассы *M. sacchariflorus* (n = 4, M ± SEM*, Чановский р-н)

Год	Морфологические признаки				Продуктивность биомассы**, т/га	
	Густота стеблестоя, шт./м ²	Длина генеративного побега, см	Облиственность, %	Число соцветий, шт./м ²	надземной	подземной
2018	64 ± 3	78,4 ± 15,5	50 ± 8	0	0,7 ± 0,3	–
2019	164 ± 8	83,9 ± 5,7	50 ± 7	3 ± 0,7	3,0 ± 0,3	2,4 ± 0,7
2020	212 ± 8	107,5 ± 3,0	50 ± 4	0	5,2 ± 0,8	4,2 ± 0,9

Примечание.

* – здесь и далее в табл. 5–7 результаты представлены в виде среднего арифметического значения и стандартного отклонения (M ± SEM). * – абсолютно сухая масса.

Недостаточная увлажненность в последующие годы повлияла на длину генеративного побега – к третьему году вегетации она достигла всего лишь 107,5 см при возможных 200 см, растения характеризовались отсутствием соцветий и облиственностью 50%. Несмотря на это, отмечено увеличение густоты стеблестоя (до 212 шт./м²) и достаточный прирост надземной биомассы культуры (до 5,2 т/га). Продуктивность подземной биомассы к концу третьего года вегетации составила 4,2 т/га

и практически сравнялась с величиной надземной биомассы, что свидетельствует о достаточно высокой адаптивности культуры к физико-химическим условиям лугово-чернозёмного солонца (Gleyic Solonetz).

Влияние *M. sacchariflorus* на обеспеченность почв элементами минерального питания. В течение вегетационных периодов 2018–2020 годов наблюдалось заметное потребление *M. sacchariflorus* азота и калия, обусловленное интенсивным развитием молодых растений и разрастанием плантации (табл. 5). Содержание фосфора в биомассе существенно не изменялось между началом и концом вегетации, что говорит о низкой потребности культуры в данном элементе. Сравнение данных по годам свидетельствует о существенном увеличении содержания азота нитратов в почве на третий год вегетации. Возможно, это обусловлено усилением процессов минерализации органического вещества в почве.

Таблица 5

Сравнение агрохимических свойств солонцевой почвы при возделывании *M. sacchariflorus*

Время отбора	Глубина, см	Нитраты, мг N-NO ₃ /кг	Фосфор*, мг P ₂ O ₅ /кг	Калий*, мг K ₂ O/кг
2018 г.				
весна	0-20	2,60 ± 0,28	72,5 ± 5,1	25,21 ± 2,11
осень	0-20	1,90 ± 0,13	71,0 ± 4,9	22,96 ± 3,80
2019 г.				
весна	0-20	2,27 ± 0,67	79,37 ± 5,15	25,76 ± 4,97
осень	0-20	1,53 ± 0,46	78,19 ± 6,30	17,70 ± 3,81
2020 г.				
весна	0-20	7,93 ± 2,58	55,62 ± 16,63	19,41 ± 3,26
осень	0-20	3,05 ± 1,13	43,50 ± 12,36	14,68 ± 4,59

Примечание.

* – фосфор подвижный и калий обменный определены по Чирикову в модификации ЦИНАО (экстрагент – 0,5 М CH₃COOH).

Оценка содержания элементов-биофилов (азот, фосфор, калий, натрий) в надземной биомассе *M. sacchariflorus*, отобранной в фазу отмирания (рис. 2), показала, что их вынос растениями невелик. Это объясняется тем, что после окончания вегетации питательные элементы в растениях *M. sacchariflorus* подвергаются реутилизации в корневища, создавая запас для возобновления вегетации в следующем году.

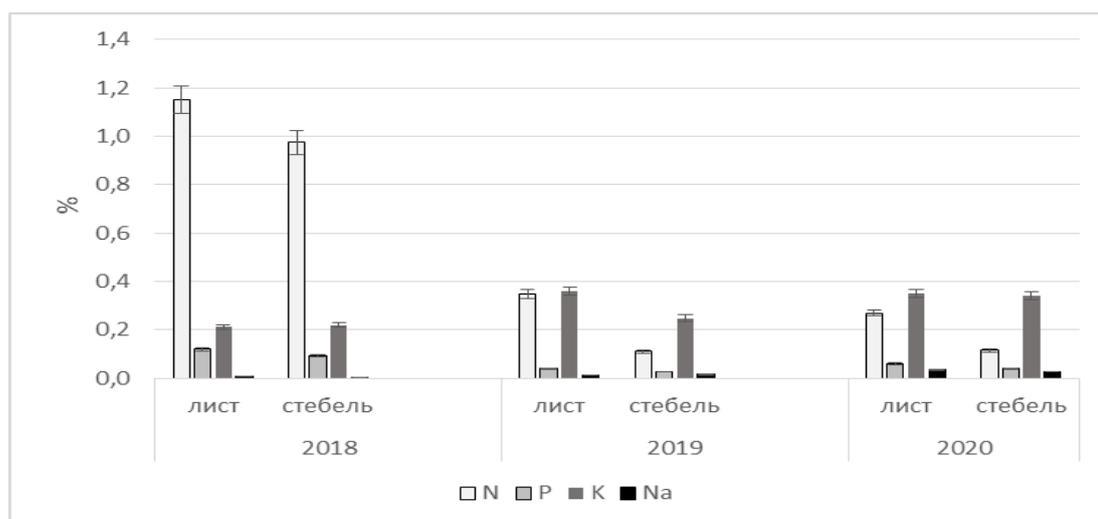


Рисунок 2. Содержание биофильных элементов в надземной биомассе *M. sacchariflorus* в фазу отмирания (старения) культуры. Здесь и далее на рис. 3–7 вертикальные планки погрешности представляют собой доверительные интервалы при уровне значимости $\alpha = 0,05$ ($t_{0,05} \cdot \frac{1}{2} \text{SEM}$).

В среднем за три года, содержание элементов в биомассе составило (% от абсолютно сухого вещества): азота – 0,5, фосфора – 0,06, калия – 0,30, натрия – 0,02. Учитывая, что средняя урожайность *M. sacchariflorus* в наших опытах за три года равна 3 т/га, ежегодный вынос элементов питания из почвенных запасов составил (кг/га): азота – 8,2, фосфора – 1,4, калия – 9,7, натрия – 0,6. В целом, вынос *M. sacchariflorus* химических элементов из почвы низкий и связан, как указывалось выше, со способностью культуры к эффективной их реутилизации.

Влияние выращивания *M. sacchariflorus* на химические свойства солонцовых почв. За время проведения исследований (2018–2020 гг.) наблюдалось снижение величины рН почвенного раствора и некоторое изменение состава водной вытяжки. Существенно уменьшилось содержание бикарбонат-иона и увеличилось содержание сульфат-иона (табл. 6).

Таблица 6

Содержание водорастворимых солей в исследуемой почве (слой 0–20 см)

рН	Сухой остаток, %	Концентрация ионов, мг-экв/100 г почвы							Сумма анионов	Сумма катионов
		HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺		
2018 г.										
6,53±0,06	0,09±0,02	0,52±0,03	0,10±0,03	0,80±0,01	0,20±0,03	0,85±0,05	0,04±0,01	0,21±0,06	1,42±0,20	1,30±0,25
2019 г.										
6,25±0,06	0,06±0,03	0,07±0,01	0,12±0,04	0,74±0,04	0,20±0,07	0,77±0,06	0,02±0,01	0,14±0,07	0,93±0,27	1,13±0,35
2020 г.										
6,03±0,06	0,08±0,02	0,05±0,03	0,14±0,03	0,87±0,01	0,10±0,04	0,72±0,05	0,04±0,03	0,13±0,06	1,06±0,26	0,98±0,20

Заметно также снижение содержания иона Na⁺, что в целом ведёт к снижению содержания соды. Можно предположить наличие слабо выраженного перехода от токсичного содово-сульфатного химизма засоления почвы к нейтральному сульфатному, но, учитывая чрезвычайную динамичность солевого состава и зависимость его от гидротермических условий вегетационного периода, для достоверности вывода требуется более длительный период наблюдений.

Обращает на себя внимание и существенное снижение содержания обменного натрия в ППК на третий год выращивания мискантуса (табл. 7). Возможно, это явление связано с процессом рассолонцевания, перехода ионов натрия в почвенный раствор и последующего вымывания в нижние горизонты.

Таблица 7

Содержание гумуса и обменных катионов в исследуемой почве (слой 0–20 см)

Гумус, %	Обменные катионы, ммоль/100 г почвы				Сумма ПО, ммоль/100 г	Na ⁺ + Mg ²⁺ , % от суммы ПО
	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺		
2018 г.						
5,59 ± 0,36	9,73 ± 0,21	6,55 ± 0,62	0,95 ± 0,02	0,22 ± 0,01	21,73 ± 0,78	31,15
2019 г.						
5,59 ± 0,36	11,53 ± 0,84	5,42 ± 1,14	0,84 ± 0,07	0,22 ± 0,07	20,93 ± 0,75	26,95
2020 г.						
5,56 ± 0,12	11,03 ± 1,21	5,58 ± 0,63	1,30 ± 0,15	0,07 ± 0,05	21,63 ± 0,23	26,12

Изучение реакции *M. sacchariflorus* на почвенное засоление в условиях вегетационного опыта. В условиях вегетационного опыта оценивались такие показатели как развитие и накопление биомассы растений, содержание биофильных элементов в биомассе и почвах под культурой. В табл. 8 приведены данные, свидетельствующие об изменении солевого состава исследуемых почв в результате выращивания мискантуса. Во всех вариантах, кроме солонца глубокого, после вегетации мискантуса наблюдается снижение содержания солей (сухого остатка). В частности, отмечено уменьшение содержания ионов хлора во всех вариантах опыта и сульфатов в вариантах 3–5. Высокое содержание натрия в вариантах 4 и 5 снизилось к окончанию опыта в 1,5–2,5 раза.

В условиях вегетационного опыта снижение содержания солей, возможно, связано с выносом минеральных элементов корневой системой растений, о чем свидетельствует накопление натрия в корневищах растений (рис. 3).

Таблица 8

Содержание водорастворимых солей в исследуемых почвах

Время отбора*	pH _{вод}	Сухой остаток, %	Концентрация ионов, мг-экв/100 г почвы							Сумма анионов	Сумма катионов
			CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺		
Вариант 1. Лугово-чернозёмная слабосолонцеватая мощная (Gleyic Chernozems (Oligonatric))											
1	7,00	0,10	–	0,42	0,35	0,56	0,50	1,70	0,07	1,33	2,27
2	7,60	0,05	–	0,50	0,07	1,02	0,67	1,12	0,10	1,59	1,89
Вариант 2. Солонец лугово-чернозёмный глубокий (Gleyic Solonetz (Humic))											
1	7,15	0,08	–	0,37	0,22	0,76	0,30	0,85	0,16	1,36	1,31
2	6,65	0,15	–	0,02	0,16	1,76	0,70	0,80	0,28	1,95	1,78
Вариант 3. Солонец лугово-чернозёмный корковый (Gleyic Solonetz (Ochric, Sodic))											
1	8,20	0,30	–	0,81	0,41	1,12	0,67	1,15	1,02	2,35	2,84
2	7,20	0,12	–	0,15	0,26	1,0	0,55	0,97	0,19	1,41	1,71
Вариант 4. Аллювиальная слоистая слаборазвитая солончаковая (Episalic Fluvisols (Alcalic, Sodic))											
1	9,0	1,46	–	1,62	12,27	6,72	0,55	5,80	13,20	20,61	18,55
2	8,60	0,57	–	0,79	6,14	2,76	0,43	1,55	6,76	9,69	8,74
Вариант 5. Лугово-болотная солончаковая (Episalic Mollic Gleysols (Alcalic, Sodic))											
1	8,87	1,30	–	0,74	7,82	5,08	0,8	4,65	6,71	13,64	12,16
2	8,75	0,51	–	0,74	4,32	2,56	0,42	2,05	4,42	7,62	6,89

Примечание.

*Время отбора образцов: 1 – до вегетации мискантуса, 2 – после его вегетации.

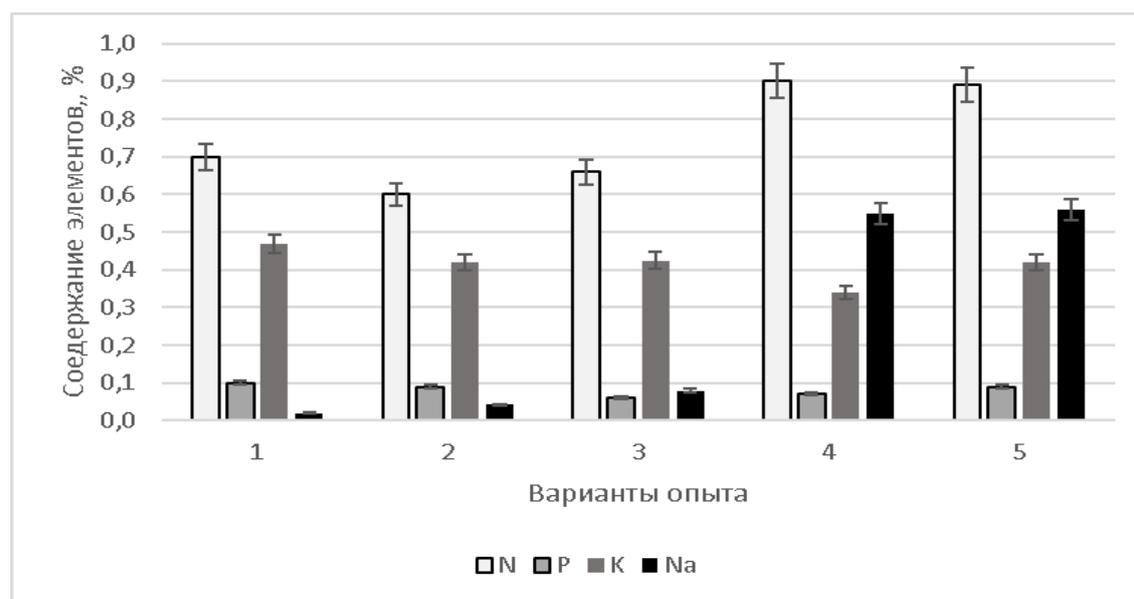


Рисунок 3. Содержание элементов в подземной биомассе (корни + корневища), % от абсолютно сухой массы.

Содержание минеральных элементов в биомассе. В корневищах растений на засоленных почвах возросло количество азота и натрия по сравнению с контрольной лугово-чернозёмной почвой. Содержание фосфора и калия незначительно снизилось, при этом наблюдалось стабильное содержание калия в подземной части растений, за исключением варианта 4 с аллювиальной солончаковой почвой, которая характеризуется наибольшим исходным содержанием легкорастворимых солей (см. табл. 8).

В надземной биомассе (листья + стебли) мискантуса увеличение концентрации солей в субстрате вызывало повышение содержания натрия и существенное повышение содержания азота, но почти не изменило содержание фосфора. Содержание калия в засоленных субстратах достоверно снижается по мере увеличения степени засоления (рис. 4).

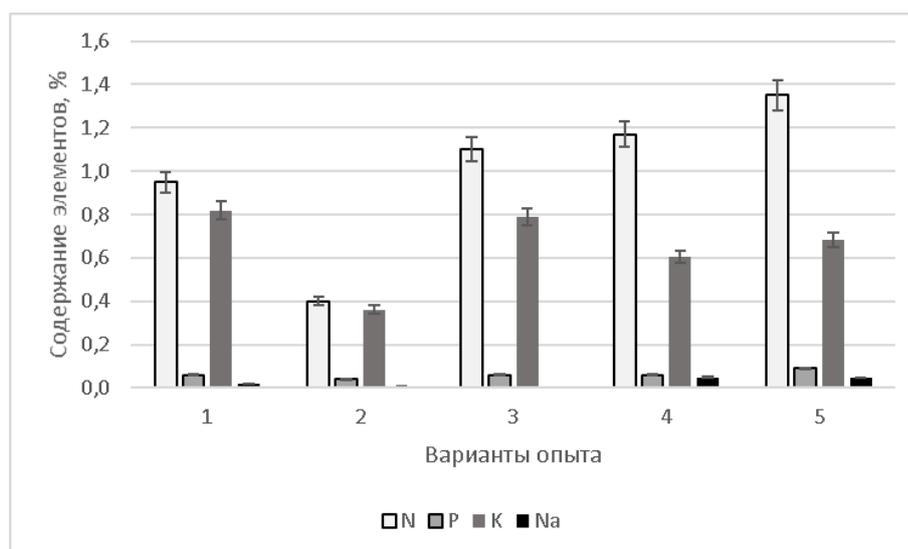


Рисунок 4. Содержание элементов в надземной биомассе мискантуса, % от абсолютно сухой массы.

Следует добавить, что калий накапливался в надземной биомассе мискантуса в значительно большей концентрации, чем в корневищах, в отличие от ионов Na^+ , которых в корневищах было в среднем в десять раз больше, чем в надземной биомассе; особенно явно это проявляется на сильно засоленных почвах вариантов 4 и 5. Вероятно, корневая система мискантуса осуществляет барьерные функции относительно проникновения избыточных количеств натрия в надземную часть растений, что позволяет предполагать способность этой культуры к адаптации в засоленных ландшафтах.

Взаимосвязь между содержанием минеральных элементов и параметрами роста растений.

Наблюдения за развитием *M. sacchariflorus* на протяжении всего периода эксперимента показали, что в контрольном варианте с благоприятной лугово-чернозёмной почвой растения отличались наибольшим количеством и высотой побегов (рис. 5 и 6) по сравнению с другими вариантами опыта.

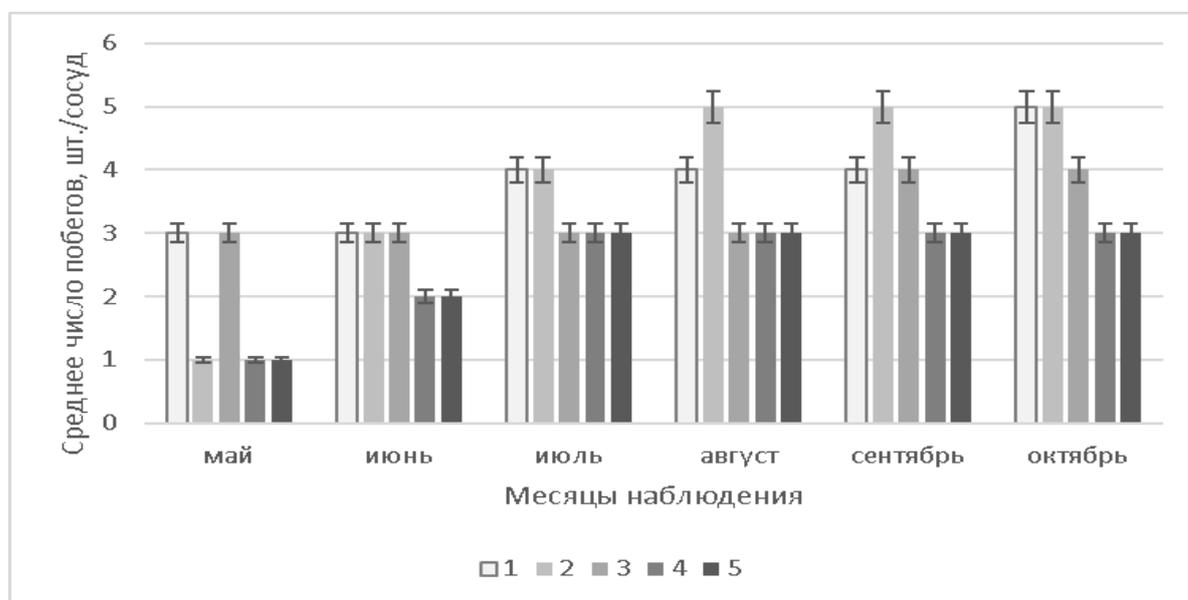


Рисунок 5. Влияние засоления почв на количество побегов мискантуса.

Варианты опыта (здесь и далее на рис. 6–8): 1 – лугово-чернозёмная слабосолонцеватая почва (Gleyic Chernozems (Oligonatric)) – контроль; 2 – солонец лугово-чернозёмный глубокий (Gleyic Solonetz (Humic)); 3 – солонец лугово-чернозёмный корковый (Gleyic Solonetz (Ochric, Sodic)); 4 – аллювиальная слоистая слаборазвитая солончаковая почва (Episalic Fluvisols (Alcalic, Sodic)); 5 – лугово-болотная солончаковая почва (Episalic Mollic Gleysols (Alcalic, Sodic)).

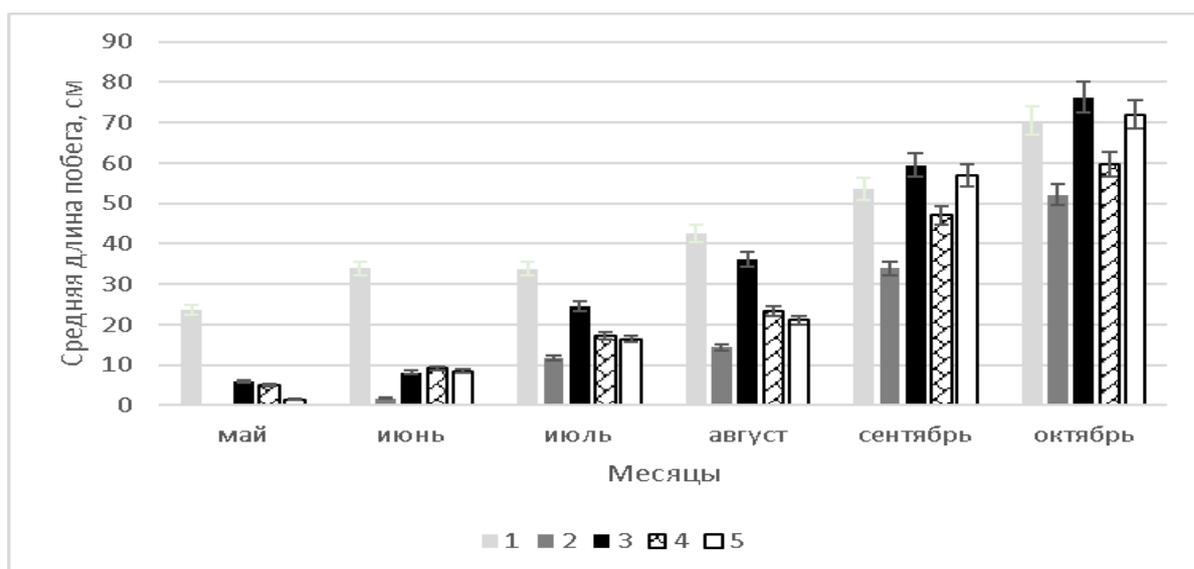


Рисунок 6. Влияние засоления на высоту растений мискантуса в течение вегетационного периода. Варианты опыта: см. рис. 5.

Начало отрастания на контрольном варианте с лугово-чернозёмной почвой было самым активным; увеличение длины побегов во времени происходило равномерно (см. рис. 5 и 6). В вариантах с засолением в начальный период вегетации наблюдалось слабое развитие побегов по сравнению с контролем. Большинство корневищ не давало побегов в первый месяц вегетации (варианты 2, 4, 5), оставаясь при этом жизнеспособными.

Особенности развития растений мискантуса при наличии солей в почве оказывали влияние на формирование биомассы мискантуса (рис. 7). Замедленное пробуждение почек и развитие побегов в начальный период вегетации привело к снижению биомассы как наземной, так и подземной части растений на засоленных почвах (рис. 8).

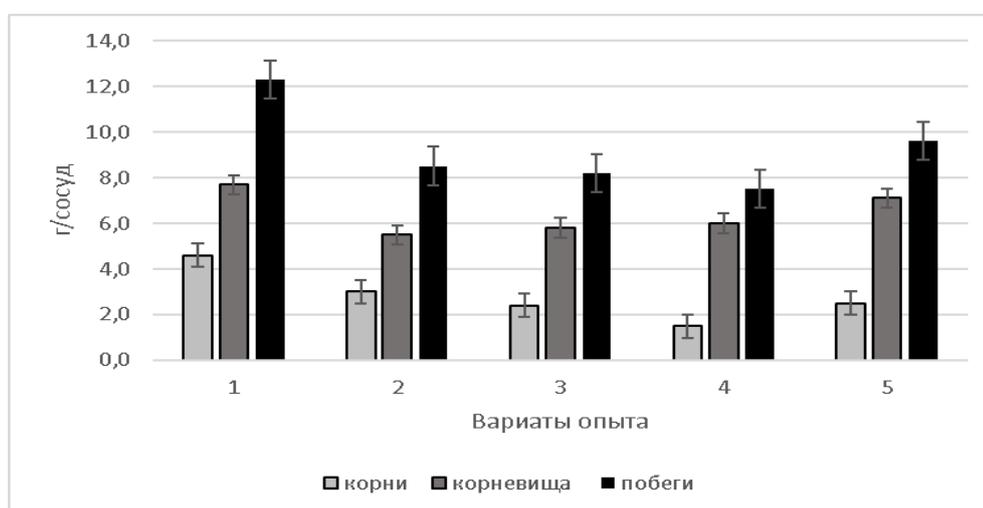


Рисунок 7. Влияние засоления на накопление биомассы растений. Варианты опыта: см. рис. 5.



Рисунок 8. Накопление подземной биомассы растений в зависимости от засоления. Варианты опыта: см. рис. 5.

Максимальный прирост молодых длинных белых корней отмечен в контрольном варианте. В засоленных почвах подземная масса корней была на 34–65% меньше, чем на контроле. На рис. 7 и 8 отражено наибольшее влияние щелочных солей на корневую систему в варианте 4 (аллювиальная слоистая солончаковая почва). Биомасса корневищ, которые развиваются позже, в варианте с аллювиальной солончаковой почвой находится в пределах доверительного интервала с вариантами на глубоком и корковом солонцах, видимо, за счёт существенного снижения концентрации почвенного раствора и содержания бикарбоната натрия в процессе вегетации. В 5-м варианте с лугово-болотной солончаковой почвой биомасса корневищ даже превышает таковую во 2-м, 3-м и 4-м вариантах с солонцовыми почвами, худшими по физическим свойствам. Та же закономерность снижения биомассы в целом повторяется и в надземной части растений.

Таким образом, результаты полевого и вегетационного опытов показали, что *M. sacchariflorus* может произрастать на солонцовых почвах, давая урожай биомассы до 5 т/га при засушливых условиях вегетационного периода. Корневая система *M. sacchariflorus*, вероятно, обладает барьерными свойствами, защищая надземную биомассу от избыточного поступления токсичных элементов, в частности натрия, что позволяет предположить наличие способности культуры адаптироваться к засоленным почвам.

ОБСУЖДЕНИЕ

Цикл развития *M. sacchariflorus* составляет 10–15 лет и более. По многочисленным литературным данным (Bonin et al., 2014; Mi et al., 2014; Zheng et al., 2019), в условиях естественного произрастания *M. sacchariflorus* значения гидротермического коэффициента за вегетационный период варьируют от 1,49 до 2,9, сумма эффективных температур $>10\text{ }^{\circ}\text{C}$ – от 1249 до 2493 $^{\circ}\text{C}$. В Германии средняя 14-летняя урожайность *M. sacchariflorus* составляет 10,7 т/га (Bonin et al., 2014). На территории России для его культивирования пригодна не только область естественного произрастания вида на Дальнем Востоке, но и горные районы Северного Кавказа, а также отдельные районы юга Сибири и Европейской части России (Багмет, Дзюбенко, 2019). Что касается продуктивности *M. sacchariflorus* при выращивании его в засоленных агроландшафтах, то даже в засушливых погодных условиях, сложившихся в годы проведения нашего полевого эксперимента, данная культура способна давать урожай биомассы до 5 т/га, существенно превышая средние значения продуктивности естественных фитоценозов. В более благоприятные по условиям увлажнения годы следует ожидать более высокие значения урожайности культуры.

В научной литературе обсуждаются вопросы фитомелиорирующего действия и средообразующего влияния на почву *M. sacchariflorus*. Результаты зарубежных исследователей показали, что выращивание *Miscanthus* на солончаковой щелочной почве снижает её засоление и повышает плодородие. В частности, за пятилетний период выращивания *Miscanthus* отмечено снижение рН почвы на 0,33 единицы (8,78–8,45), увеличение содержания органического вещества в почве с 18,9 до 34,9 г/кг и общего содержания калия с 15,2 до 18,0 г/кг (Xu et al., 2021). Это подтверждается и нашими исследованиями: снижение рН наблюдалось в большинстве случаев как в полевом, так и в вегетационном опыте.

Ранее проведенные зарубежные исследования показали, что корневая система культуры способна влиять на снижение рН почвы (Кауама, 2001) и увеличивать её пористость, что также может способствовать опреснению почвы за счёт выщелачивания (Ado et al., 2019). Эффект улучшения структурного состояния почвы был получен нами на примере серых лесных супесчаных почв в опыте с многолетним выращиванием мискантуса. После 15-летнего произрастания этой культуры содержание агрономически ценной фракции составило 71%, агрегатное состояние из категории «удовлетворительное» перешло в категорию «хорошее», а водопрочность агрегатов оценивается как «отличная», что обусловлено, возможно, накоплением органической массы в почве (Капустянчик, 2022).

Некоторые исследователи считают, что поскольку *Miscanthus* относится к C4 типу, быстрорастущему растению, он способен активно поглощать и удалять ионы солей (Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+}) из засоленных почв с помощью своей высокоурожайной биомассы (Zheng et al., 2019). Однако считаем, что этот аргумент актуален при условии отчуждения биомассы листьев в качестве продукции с территории произрастания. В случае оставления массы листьев растений *Miscanthus* до полного окончания вегетации и перехода их в опад (с целью получения только стеблей, как источника целлюлозы) большое количество питательных элементов подвергается реутилизации в корневища и возвращается в почву с опадом, обеспечивая тем самым многократный оборот запасов важнейших элементов питания.

Повышение плодородия почвы за счёт выращивания *Miscanthus* является важным аспектом улучшения засоленных почв. Органическое вещество почвы играет большую роль в поддержании плодородия почвы, поскольку оно выполняет такие важные функции экосистемы, как формирование структуры и водоудерживающей способности почвы, хранения питательных веществ (Schmidt et al., 2011). Многие исследователи утверждают, что выращивание *Miscanthus* может увеличить запасы органического углерода в почве (Mi et al., 2014; Chen et al., 2020; Zhao C. et al., 2020; Zhao Q. et al., 2020). Так, было обнаружено (Xu et al., 2021), что выращивание *Miscanthus* на солонцевой щелочной почве может увеличить содержание органического вещества в почве на 3,2 г/кг в год за счёт большого количества биомассы, пожнивных остатков на поле и возвращаемым в почву опадом. Следовательно, *Miscanthus* может представлять огромный потенциал для улучшения плодородия почвы и накопления в ней органического вещества.

ВЫВОДЫ

Результаты проведённых исследований показали, что *M. sacchariflorus* довольно продуктивен на засоленных землях и даже в острозасушливых погодных условиях способен давать урожай биомассы более 5 т/га, что свидетельствует о широких адаптационных возможностях данной культуры. Посадки *M. sacchariflorus* обладают положительной средообразующей способностью, оказывая благоприятное экологическое влияние на основные элементы почвенного плодородия: накопление органического вещества в корневых остатках и почве, обогащение пахотного слоя элементами минерального питания, улучшение химических и физических свойств засоленных почв.

Таким образом, *M. sacchariflorus*, как многолетнее растение, способное произрастать длительное время на низко продуктивных землях, мог бы использоваться как фитомелиорирующая культура наряду с такими известными фитомелиорантами как донник, люцерна, суданская трава. Оценка перспективности возделывания *M. sacchariflorus* и его средоулучшающих свойств на солонцевых почвах в масштабах России позволит существенно расширить зону его выращивания. В наших исследованиях показано, что размещение посадок *M. sacchariflorus* на гидроморфных засоленных почвах, занимающих огромные пространства в Западной Сибири и практически неиспользуемых в сельскохозяйственном производстве, позволит обеспечить более высокую экономическую отдачу от данных угодий, учитывая минимальные требования к подготовке почвы для посадки и дальнейшей обработке агроценоза.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают искреннюю благодарность Ломовой Т.Г., канд. с.-х. наук, ведущему научному сотруднику лаборатории сенокосов и пастбищ Сибирского научно-исследовательского института кормов СФНЦА РАН за предоставленную возможность для проведения полевых исследований.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа поддержана бюджетным проектом Сибирского НИИ растениеводства и селекции – филиал ФИЦ Института цитологии и генетики СО РАН № FWNR-2022-0018.

ЛИТЕРАТУРА

- Адаптивно-ландшафтные системы земледелия Новосибирской области. Новосибирск: Сибирское отделение, 2002. 388 с.
- Багмет Л.В., Дзюбенко Е.А. Прогнозирование областей культивирования *Miscanthus sacchariflorus* (*Poaceae*) на территории Российской Федерации // *Vavilovia*. 2019. Том 2. № 4. Р. 35–49. <https://doi.org/10.30901/2658-3860-2019-4-35-49>
- Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). Москва: Агропромиздат, 1985. 351 с.
- Журбицкий З.И. Теория и практика вегетационного метода. Москва: Наука, 1968. 266 с.
- Капустянчик С.Ю. Агроэкологические основы интродукции культуры мискантус в условиях лесостепи Западной Сибири. Автореферат диссертации ... д-р. с.-х. наук. Новосибирск, 2022. 40 с.
- Ковда В.А. Основы учения о почвах. Кн. 2. Москва: Наука, 1973. 468 с.
- Константинов М.Д., Ломова Т.Г. Система использования комплексных солонцевых почв // *Земледелие*. 2007. № 4. С. 5–6.

- Константинов М.Д., Кухарь М.А. Улучшение свойств средних солонцов в фитомелиоративных луговых севооборотах Западной Сибири // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. 2007. № 6. С. 32–39.
- Методические указания по проведению полевых опытов с кормовыми культурами. Москва: ВНИИ кормов, 2007. 60 с.
- Нечаева Т.В. Залежные земли России: распространение, агроэкологическое состояние и перспективы использования (обзор) // Почвы и окружающая среда. 2023. Том 6. № 2. e215. <https://doi.org/10.31251/pos.v6i2.215>
- Орловский Н.В. Основные моменты в использовании и улучшении солонцовых и солончаковых почв Западной Сибири // Химизация социального земледелия. 1937. № 6. С. 1–4.
- Орловский Н.В. Подбор кормовых трав и травосмесей для засоленных гривных земель Барабы и основные вопросы их агротехники // За сельскохозяйственное освоение Барабы. Новосибирск, 1946. С. 177–210.
- Панов Н.П. Причины комплексности почвенного покрова аридных территорий // Генезис и мелиорация почв солонцовых комплексов. Москва: Россельхозакадемия, 2008. С. 13–17.
- Понько В.А. Оценка и прогнозирование агроклиматических ресурсов. Новосибирск, 2012. 100 с.
- Реестр длительных стационарных полевых опытов государственных научных учреждений Сибирского отделения Россельхозакадемии / Россельхозакадемия. Сибирское отделение; составители: Л.Ф. Ашмарина, А.И. Ермохина, Т.А. Галактионова; под общей редакцией академика Россельхозакадемии Н.И. Кашеварова. Издательство 1-е. Новосибирск, 2009. С.183–184.
- Ado M.N., Michot D., Guero Y., Hallaire V., Nomaou Dan Lamso N.D., Dutin G., Walter C. Echinochloa stagnina improves soil structure and phytodesalinization of irrigated saline sodic Vertisols // Plant and Soil. 2019. Vol. 434. P. 413–424. <https://doi.org/10.1007/s11104-018-3853-9>
- Bonin C.L., Heaton E.A., Barb J. Miscanthus sacchariflorus – biofuel parent or new weed? // Global Change Biology Bioenergy. 2014. Vol. 6. Iss. 6. P. 629–636. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12098>
- Chen Y., Tian W., Shao Y., Li Y.-J., Lin L.-A., Zhang Y.-J., Han H., Chen Z.-J. Miscanthus cultivation shapes rhizosphere microbial community structure and function as assessed by Illumina MiSeq sequencing combined with PICRUSt and FUNGUId analyses // Archives of Microbiology. 2020. Vol. 202. Iss. 5. P. 1157–1171. <https://doi.org/10.1007/s00203-020-01830-1>
- Emmerling Ch., Pude R. Introducing Miscanthus to the greening measures of the EU Common Agricultural Policy (CAP) // Global Change Biology Bioenergy. 2017. Vol. 9. Iss. 2. P. 274–279. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12409>
- Kalinina O., Nunn C., Sanderson R., Hastings A.F.S., Weijde T., Özgüven M., Tarakanov I., Schüle H., Trindade L.M., Dolstra O., Schwarz K.-U., Iqbal Ya., Kiesel A., Mos M., Lewandowski I., Clifton-Brown J.C. Extending Miscanthus Cultivation with Novel Germplasm at Six Contrasting Sites // Frontiers in Plant Science. 2017. Vol. 8. P. 563. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00563>
- Kayama M. Comparison of the aluminum tolerance of *Miscanthus sinensis* Anderss. and *Miscanthus sacchariflorus* Benth in hydroculture // International Journal of Plant Sciences. 2001. Vol. 162. No. 5. P. 1025–1031. <https://doi.org/10.1086/322890>
- McCalmont J.P. Hastings A., McNamara N.P., Richter G.M., Robson P., Donnison I.S., Clifton-Brown J. Environmental costs and benefits of growing Miscanthus for bioenergy in the UK // Global Change Biology Bioenergy. 2017. Vol. 9. Iss. 3. P. 489–507. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12294>
- Mi J., Liu W., Yang W., Yan J., Li J., Sang T. Carbon sequestration by *Miscanthus* energy crops plantations in a broad range semi-arid marginal land in China // Science of the Total Environment. 2014. Vol. 496. P. 373–380. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.07.047>
- Schmidt M.W., Torn M.S., Abiven S., Dittmar T., Guggenberger G., Janssens I.A., Trumbore S.E. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property // Nature. 2011. Vol. 478. P. 49–56. <https://doi.org/10.1038/nature10386>
- Xu Y., Zheng Ch., Liang L., Yi Z., Xue Sh. Quantitative assessment of the potential for soil improvement by planting Miscanthus on saline-alkaline soil and the underlying microbial mechanism // Global Change Biology Bioenergy. 2021. Vol. 13. Iss. 7. P. 1191–1205. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12845>
- Zhao C., Fan X., Li X., Hou X., Zhang W., Yue Y., Wu J. *Miscanthus sacchariflorus* exhibits sustainable yields and ameliorates soil properties but potassium stocks without any input over a 12-year period in China // Global Change Biology Bioenergy. 2020. Vol. 12. Iss. 8. P. 556–570. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12700>
- Zhao Q., Bai J., Gao Y., Zhao H., Zhang G. and Cui B. Shifts in the soil bacterial community along a salinity gradient in the Yellow River Delta // Land Degradation and Development. 2020. Vol. 31. Iss. 16. P. 2255–2267. <https://doi.org/10.1002/ldr.3594>

Zheng Ch., Iqbal Y., Labonte N., Sun G., Feng H., Yi Z., Xiao L. Performance of Switchgrass and Miscanthus genotypes on marginal land in the Yellow River Delta // *Industrial Crops and Products*. 2019. Vol. 141. P. 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111773>

Zheng Ch., Yi Z., Xiao L., Sun G., Li M., Xue Sh., Peng X., Duan M., Chen Z. The performance of *Miscanthus* hybrids in saline-alkaline soil // *Frontiers in Plant Science*. 2022. Vol. 13. P. 1–13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.921824>

Поступила в редакцию 26.01.2024

Принята 22.03.2024

Опубликована 30.04.2024

Сведения об авторах:

Добровторская Надежда Ивановна – доктор сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник, профессор кафедры кадастра и территориального планирования Сибирского государственного университета геосистем и технологий (г. Новосибирская, Россия); dobrotvorskaya@mail.ru

Капустянчик Светлана Юрьевна – доктор сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник сектора интродукции и технологии возделывания сельскохозяйственных культур Сибирского научно-исследовательского института растениеводства и селекции (СибНИИРС) – филиал Института цитологии и генетики (ИЦиГ) СО РАН (г. Новосибирская, Россия); kapustyanchik@bionet.nsc.ru

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.



Статья доступна по лицензии [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Adaptation potential of *Miscanthus* in a solonetz agricultural landscape

© 2024 N. I. Dobrotvorskaya ¹, S. Yu. Kapustyanchik ²

¹Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russia. E-mail: dobrotvorskaya@mail.ru

²Siberian Research Institute for Plant Industry and Breeding, Branch of the Federal Research Center Institute of Cytology and Genetics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Krasnoobsk, Russia. E-mail: kapustyanchik@bionet.nsc.ru

The aim of the study was to assess the ecological adaptability of *Miscanthus* cv. Soranovsky to saline agricultural landscapes and the phytomeliorative effect of the plant on saline soils.

Location and time of the study. The field experimental part of the research was carried out in 2018–2020 in the central forest-steppe in the Barabinsky agrolandscape region (Experimental Research Station of the Siberian Federal Center for Agrobiotechnologies).

Methods. The common methods of field and vegetation experiments, chemical analysis of soils and plant samples were used in the study.

Results. *Miscanthus* can grow on solonetzic soils, providing a biomass yield of up to 5 t/ha under dry growing season conditions. The removal of nutrients from the soil by the biomass of *Miscanthus* stems was found to be low (8.2 kg/ha of nitrogen, 1.4 kg/ha of phosphorus and 9.7 kg/ha of potassium per year) due to their annual reutilization into rhizomes. This fact allow to avoid the danger of soil depletion during long-term cultivation of crops. Growing *Miscanthus* on meadow-chernozem solonetz for an average of three years led to changes in soil properties such as a decrease in pH, and changes in salts chemistry in the soil solution, manifested as a decrease in sodium bicarbonate content.

Conclusions. *Miscanthus* as a crop has wide adaptation capabilities in relation to the marginal lands of the solonetz zone of West Siberia. *Miscanthus* plantings have a beneficial environment-forming effect on solonetz soils, due to the enrichment of soils with mineral nutrition elements and improvement of soil chemical properties.

Keywords: *Miscanthus*; salt tolerance; solonetz soils; biomass; mineral nutrition elements.

How to cite: Dobrotvorskaya N.I., Kapustyanchik S.Yu. Adaptation potential of miscanthus in solonetz agricultural landscape. *The Journal of Soils and Environment*. 2024. 7(2). e247 (in Russian with English abstract). DOI: [10.31251/pos.v7i2.247](https://doi.org/10.31251/pos.v7i2.247)

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors are very thankful to Lomova T.G., Candidate of Agricultural Sciences, Leading Researcher at the Laboratory of hayfields and pastures of the Siberian Federal Scientific Center for Forage Research Institute of the Russian Academy of Sciences for the opportunity to conduct field research.

FUNDING

The study was supported by Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project No. FWNR-2022-0018).

REFERENCES

- Adaptive landscape farming systems in the Novosibirsk region. Novosibirsk: Siberian Branch, 2002. 388 p. (in Russian).
- Bagmet L.V., Dzyubenko E.A. Prediction of the potential cultivation areas of *Miscanthus sacchariflorus* in the Russian Federation. *Vavilovia*. 2019. Vol. 2. No. 4. P. 35–49. (in Russian). <https://doi.org/10.30901/2658-3860-2019-4-35-49>
- Dospheov B.A. Methodology of field experience (with the basics of statistical processing of research results). Moscow: Agropromizdat, 1985. 351 p. (in Russian).
- Zhurbitsky Z.I. Theory and practice of the vegetation method. Moscow: Nauka Publ., 1968. 266 p. (in Russian).
- Kapustyanichik S.Yu. Agroecological basis for the introduction of *Miscanthus* culture in the forest-steppe conditions of Western Siberia. Abstract of Dissertation ... Dr. of Agricultural Sci. Novosibirsk, 2022. 40 p. (in Russian).
- Kovda V.A. Fundamentals of the study of soils. Vol. 2. Moscow: Nauka Publ., 1973. 468 p. (in Russian).
- Konstantinov M.D., Lomova T.G. System of using complex solonetz soils. *Zemledelie*. 2007. No. 4. P. 5–6. (in Russian).
- Konstantinov M.D., Kukhar M.A. Improving the properties of average solonetz soils in phytomeliorative meadow crop rotations in Western Siberia. *Siberian Herald of Agricultural Science*. 2007. No. 6. P. 32–39.
- Methodological instructions for conducting field experiments with forage crops. Moscow: Russian Research Institute of Feeds, 2007. 60 p. (in Russian).
- Nechaeva T.V. Abandoned lands in Russia: distribution, agroecological status and perspective use (a review). *The Journal of Soils and Environment*. 2023. Vol. 6. No. 2. e215. (in Russian). <https://doi.org/10.31251/pos.v6i2.215>
- Orlovsky N.V. The main points in the use and improvement of solonchak soils in Western Siberia. *Chemicalization of social agriculture*. 1937. No. 6. P. 1–4. (in Russian).
- Orlovsky N.V. The choice of forage grasses and grass mixtures for the saline lands of Baraba and the main issues of their agricultural technology. In book: *On the agricultural development of Baraba*. Novosibirsk, 1946. P. 177–210. (in Russian).
- Panov N.P. Reasons for the complexity of the soil cover of arid territories. In book: *Genesis and reclamation of soils of solonetz complexes*. Moscow: Rosselkhozakademiya, 2008. P. 13–17. (in Russian).
- Ponko V.A. Assessment and forecasting of agroclimatic resources. Novosibirsk, 2012. 100 p. (in Russian).
- Register of long-term stationary field experiments of state scientific institutions of the Siberian branch of the Russian Agricultural Academy / Russian Agricultural Academy. Siberian Branch; compilers: L.F. Ashmarina, A.I. Ermokhina, T.A. Galaktionova; under general editor of acad. Russian Agricultural Academy N.I. Kashevarov. Publishers Ist. Novosibirsk, 2009. P. 183–184. (in Russian).
- Ado M.N., Michot D., Guero Y., Hallaire V., Nomaou Dan Lamso N.D., Dutin G., Walter C. *Echinochloa stagnina* improves soil structure and phytodesalinization of irrigated saline sodic Vertisols. *Plant and Soil*. 2019. Vol. 434. P. 413–424. <https://doi.org/10.1007/s11104-018-3853-9>
- Bonin C.L., Heaton E.A., Barb J. *Miscanthus sacchariflorus* – biofuel parent or new weed? *Global Change Biology Bioenergy*. 2014. Vol. 6. Iss. 6. P. 629–636. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12098>
- Chen Y., Tian W., Shao Y., Li Y.-J., Lin L.-A., Zhang Y.-J., Han H., Chen Z.-J. *Miscanthus* cultivation shapes rhizosphere microbial community structure and function as assessed by Illumina MiSeq sequencing combined with PICRUSt and FUNGuild analyses. *Archives of Microbiology*. 2020. Vol. 202. Iss. 5. P. 1157–1171. <https://doi.org/10.1007/s00203-020-01830-1>
- Emmerling Ch., Pude R. Introducing *Miscanthus* to the greening measures of the EU Common Agricultural Policy (CAP). *Global Change Biology Bioenergy*. 2017. Vol. 9. Iss. 2. P. 274–279. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12409>
- Kalinina O., Nunn C., Sanderson R., Hastings A.F.S., Weijde T., Özgüven M., Tarakanov I., Schüle H., Trindade L.M., Dolstra O., Schwarz K.-U., Iqbal Ya., Kiesel A., Mos M., Lewandowski I., Clifton-Brown J.C. Extending *Miscanthus* Cultivation with Novel Germplasm at Six Contrasting Sites. *Frontiers in Plant Science*. 2017. Vol. 8. P. 563.

<https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00563>

Kayama M. Comparison of the aluminum tolerance of *Miscanthus sinensis* Anderss. and *Miscanthus sacchariflorus* Benthham in hydroculture. International Journal of Plant Sciences. 2001. Vol. 162. No. 5. P. 1025–1031. <https://doi.org/10.1086/322890>

McCalmont J.P. Hastings A., McNamara N.P., Richter G.M., Robson P., Donnison I.S., Clifton-Brown J. Environmental costs and benefits of growing *Miscanthus* for bioenergy in the UK. Global Change Biology Bioenergy. 2017. Vol. 9. Iss. 3. P. 489–507. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12294>

Mi J., Liu W., Yang W., Yan J., Li J., Sang T. Carbon sequestration by *Miscanthus* energy crops plantations in a broad range semi- arid marginal land in China. Science of the Total Environment. 2014. Vol. 496. P. 373–380. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.07.047>

Schmidt M.W., Torn M.S., Abiven S., Dittmar T., Guggenberger G., Janssens I.A., Trumbore S.E. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. Nature. 2011. Vol. 478. P. 49– 56. <https://doi.org/10.1038/nature10386>

Xu Y., Zheng Ch., Liang L., Yi Z., Xue Sh. Quantitative assessment of the potential for soil improvement by planting *Miscanthus* on saline-alkaline soil and the underlying microbial mechanism. Global Change Biology Bioenergy. 2021. Vol. 13. Iss. 7. P. 1191–1205. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12845>

Zhao C., Fan X., Li X., Hou X., Zhang W., Yue Y., Wu J. *Miscanthus sacchriflorus* exhibits sustainable yields and ameliorates soil properties but potassium stocks without any input over a 12-year period in China. Global Change Biology Bioenergy. 2020. Vol. 12. Iss. 8. P. 556– 570. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12700>

Zhao Q., Bai J., Gao Y., Zhao H., Zhang G. and Cui B. Shifts in the soil bacterial community along a salinity gradient in the Yellow River Delta. Land Degradation and Development. 2020. Vol. 31. Iss. 16. P. 2255–2267. <https://doi.org/10.1002/ldr.3594>

Zheng Ch., Iqbal Y., Labonte N., Sun G., Feng H., Yi Z., Xiao L. Performance of Switchgrass and *Miscanthus* genotypes on marginal land in the Yellow River Delta. Industrial Crops and Products. 2019. Vol. 141. P. 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111773>

Zheng Ch., Yi Z., Xiao L., Sun G., Li M., Xue Sh., Peng X., Duan M., Chen Z. The performance of *Miscanthus* hybrids in saline-alkaline soil. Frontiers in Plant Science. 2022. Vol. 13. P. 1–13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.921824>

Received 26 January 2024

Accepted 22 March 2024

Published 30 April 2024

About the authors:

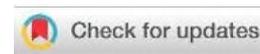
Nadezhda I. Dobrotvorskaya – Doctor of Agricultural Sciences, Senior Researcher, Professor of the Department of Cadastre and Territorial Planning of the Siberian State University of Geosystems and Technologies (Novosibirsk, Russia); dobrotvorskaya@mail.ru

Svetlana Yu. Kapustyanchik – Doctor of Agricultural Sciences, Leading Researcher in the sector of Introduction and Technology of Cultivation of Crops in the Siberian Research Institute of Plant Growing and Breeding – the branch of the Federal Research Center the Institute of Cytology and Genetics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); kapustyanchik@bionet.nsc.ru

The authors read and approved the final manuscript



The article is available under [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)



Продуктивность и качество клубней картофеля при внесении калия и магния на фоне азотно-фосфорных удобрений

© 2024 Н. Б. Наумова , Т. В. Нечаева , О. А. Русалимова , О. А. Савенков , В.Н. Якименко 

ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, проспект Академика Лаврентьева, 8/2, г. Новосибирск, 630090, Россия. E-mail: naumova@issa-siberia.ru

Цель исследования – изучение влияния совместного внесения калия и магния на продукционные показатели и качество клубней картофеля на фоне градиента почвенно-экологических условий, сформированного пятью опытными участками, расположенными в лесостепной зоне Западной Сибири.

Место и время проведения. Микрополевой опыт по выращиванию картофеля среднераннего сорта Джелли с тремя вариантами удобрений (N100P60, N100P60+K100 и N100P60+K100+Mg100) в пятикратной повторности заложили на пяти участках с агросерыми почвами в Новосибирской области в 2023 году. Географические координаты месторасположения опытных участков варьировали в пределах 55°15'40" до 54°47'09" с.ш. и от 83°31'42" до 82°37' 56" в.д.

Методы. В данной работе вместо традиционного временного градиента (3–4 года проведения опыта на одном участке), используемого для учёта влияния разных погодных условий, с этой же целью применили пространственный градиент, позволивший дополнительно оценить влияние варьирования свойств почвы между опытными участками. Отобранные до закладки опыта почвенные образцы проанализировали на содержание органического вещества, нитратного и аммонийного азота, легкоподвижного фосфора, обменного калия и магния; также определили кислотность почвы ($pH_{вод}$) и её электропроводность. В ходе опыта непрерывно автоматически регистрировали температуру воздуха (на высоте 2 м от поверхности почвы) и почвы (на глубине 5 и 15 см). По окончании опыта, при уборке урожая учитывали число и массу клубней на каждой делянке, а также надземную фитомассу. После пяти месяцев хранения оценивали кулинарные свойства (вкус, цвет, аромат, мучнистость и рассыпчатость) отваренных клубней по гедонической шкале. Для статистической обработки полученных данных применили анализ дисперсии, главных компонент и множественной регрессии методом частных наименьших квадратов, для чего использовали пакет программ Statistica v. 13.1.

Основные результаты. Внесение калия на фоне азотно-фосфорных удобрений (вариант N100P60+K100) повысило урожай клубней картофеля на 30%, а надземной фитомассы – на 40%. Дополнительное внесение магния (N100P60+K100+Mg100) не оказало влияния на продукционные показатели картофеля, однако заметно повысило кулинарное качество клубней. Более половины дисперсии продукционных показателей картофеля связано с различием почвенно-экологических условий опытных участков. Основными почвенными свойствами, позволяющими прогнозировать продуктивность клубней, были содержание обменного магния, аммонийного азота, а также реакция среды ($pH_{вод}$). Вклад почвенно-экологических условий опытных участков в дисперсию оценок кулинарных свойств клубней был весьма незначителен, но, тем не менее, статистически значим для аромата и цвета ($p \leq 0,05$) с аналогичным трендом для вкуса и рассыпчатости ($0,05 \leq p \leq 0,10$). Агрохимические свойства почв – содержание органического углерода, легкоподвижного фосфора и нитратного азота, а также реакция среды, были определяющими в прогностической модели потребительских свойств будущего урожая.

Заключение. Проведённые исследования на агросерых почвах в лесостепной зоне Западной Сибири подтвердили важность оптимизации минерального питания картофеля. Внесение сбалансированных доз НРК удобрений существенно повышало продуктивность выращиваемого картофеля по сравнению с использованием только NP; дополнительное к НРК внесение Mg не приводило к дальнейшему росту урожайности, однако заметно улучшало кулинарные свойства клубней. Результаты статистического анализа полученных экспериментальных данных выявили тесную зависимость продуктивности картофеля (и, в заметной степени, качества клубней) от почвенных свойств (эффективное плодородие) и погодных условий вегетационного периода (температура почвы и воздуха), что целесообразно использовать в прогностических моделях величины и качества будущего урожая.

Ключевые слова: Западная Сибирь; агросерая почва; минеральные удобрения; картофель; органолептические свойства клубней; почвенно-экологические условия.

Цитирование: Наумова Н.Б., Нечаева Т.В., Русалимова О.А., Савенков О.А., Якименко В.Н. Продуктивность и качество клубней картофеля при внесении калия и магния на фоне азотно-фосфорных удобрений // Почвы и окружающая среда. 2024. Том 7. № 2. e268. DOI: [10.31251/pos.v7i2.268](https://doi.org/10.31251/pos.v7i2.268).

ВВЕДЕНИЕ

Картофель является одной из основных сельскохозяйственных культур во всем мире, в том числе и в России, имея пищевое, кормовое и техническое назначение. Ежегодное производство картофеля всеми типами хозяйств нашей страны составляет более десяти миллионов тонн: по данным Международной сельскохозяйственной и продовольственной организации ООН (FAOSTAT ..., 2024) в 2022 г. Россия получила 18,9 млн тонн картофеля, став четвертым производителем в мире, после Китая, Индии и Украины. По итогам 2023 года, согласно информации ФГБУ «Центр Агроаналитики» Министерства сельского хозяйства России (Центр ..., 2024), производство картофеля в организованном секторе страны составило 8,6 млн тонн.

В последние годы интерес к картофелю как основе для разработки новых функциональных продуктов питания (Xu et al., 2023) и модификации с той же целью традиционных (Singh et al., 2021) возрос. Важность сбалансированного обеспечения картофеля питательными элементами трудно переоценить (Koch et al., 2020a). Ранее было отмечено, что внесение удобрений может вызвать дефицит магния (Knoblauch, Ödland, 1934). В настоящее время во всем мире из-за распространения интенсивных технологий сельскохозяйственного производства вынос магния приводит к его недостатку в почве (Tein et al., 2014), что становится все более распространенным явлением. Дефицит магния, который выполняет роль кофактора в более 300 биохимических процессах, ухудшает синтез хлорофилла, транспорт сахаров и энергетический метаболизм растений, снижая их рост и развитие (Аристархов, 2002; Тихомирова, 2011; Koch et al., 2019). Так, у паслёновых выявлено снижение роста корней при дефиците магния (Koch et al., 2020b; Ishfaq et al., 2021). Внесение магниевых удобрений становится все более актуальным для повышения продукции сельскохозяйственных культур (Wang et al., 2020). Однако совместное применение калия и магния может нарушить баланс этих элементов в растении, что, в свою очередь, способно повлиять не только на производственные показатели, но и на пищевые свойства выращиваемых культур, в том числе, клубней картофеля. Поэтому для разных агрономических контекстов (Yakimenko, Naumova, 2021) необходимо изучать оптимальное соотношение питательных элементов, вносимых с удобрениями.

Целью работы было изучение влияния совместного внесения калия и магния на производственные показатели и качество клубней картофеля на фоне градиента почвенно-экологических условий, сформированного пятью опытными участками, расположенными в лесостепной зоне Западной Сибири.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальные участки. Микрополевым опытом заложен в 2023 г. на пяти участках в различных административных районах Новосибирской области в лесостепной зоне со следующими координатами: У-1 – 55,091594° с.ш., 83,020692° в.д.; У-2 – 54,965379° с.ш., 83,219413° в.д.; У-3 – 54,982721° с.ш., 82,379481° в.д.; У-4 – 54,785833° с.ш., 83,087222° в.д.; У-5 – 55,260964° с.ш., 83,528411 в.д. Почвы – агросерые среднесуглинистые (Классификация ..., 2004), длительное время находящиеся в сельскохозяйственном использовании. Характеристика почв пяти опытных участков представлена в табл. 1. Перед закладкой опыта (до внесения удобрений и посадки картофеля) почвы экспериментальных участков имели высокое содержание органического углерода, нейтральную и слабощелочную реакцию среды, что благоприятно для нормального роста и развития большинства сельскохозяйственных культур (Шпаар и др., 2004). Согласно существующим грациям, обеспеченность почв нитратным азотом варьировала от средней до высокой (Агрохимические свойства ..., 1989, с. 42, табл. 23), легкоподвижным фосфором – от средней до очень высокой (Аверкина, Науменко, 2017, с. 58, табл. 3), обменным калием – от низкой до повышенной при выращивании картофеля (Якименко, 2003, с. 142, табл. 43; Якименко, 2005, с. 12, табл. 3), обменным магнием – от средней до очень высокой (Методические указания ..., 2003, с. 183, прилож. 35). В целом же, проведение опыта на участках с исходно различающимися почвенными свойствами позволяет, на наш взгляд, установить не только действие внесения калия на фоне NP-удобрений как отдельно, так и в комбинации с магнием (NP+K+Mg), но и распространить полученный результат и на другие почвы со свойствами в пределах изученного в опыте диапазона.

Таблица 1

Свойства почв разных опытных участков (среднее \pm стандартное отклонение)

Показатель*	Опытный участок				
	У-1	У-2	У-3	У-4	У-5
pH _{вод}	7,62 \pm 0,21 b**	7,74 \pm 0,07 b	7,96 \pm 0,05 c	7,04 \pm 0,11 a	7,04 \pm 0,07 a
C _{орг} , %	4,1 \pm 0,1 a	8,3 \pm 0,1 c	13,7 \pm 0,6 d	5,8 \pm 0,7 b	7,6 \pm 0,1 c
C _{неорг} , %	0,2 \pm 0,0 a	0,5 \pm 0,1 b	1,6 \pm 0,3 c	0,2 \pm 0,0 a	0,4 \pm 0,0 ab
P-P ₂ O ₅ , мг/кг	1,2 \pm 0,5 a	5,9 \pm 1,0 b	5,4 \pm 5,0 b	0,5 \pm 0,4 a	0,7 \pm 0,3 a
N-NO ₃ , мг/кг	11 \pm 6 a	19 \pm 5 a	163 \pm 104 b	31 \pm 7 a	9 \pm 2 a
N-NH ₄ , мг/кг	2,4 \pm 1,0 a	4,4 \pm 0,8 a	8,7 \pm 1,9 b	3,9 \pm 0,4 a	7,8 \pm 1,5 b
K, мг/кг	130 \pm 25 a	105 \pm 20 a	960 \pm 488 b	61 \pm 6 a	176 \pm 5 a
Mg, мг/кг	181 \pm 17 a	343 \pm 35 b	913 \pm 36 d	151 \pm 18 a	506 \pm 1 c
K/Mg	0,45 \pm 0,11 ab	0,19 \pm 0,02 a	0,66 \pm 0,35 b	0,25 \pm 0,03 a	0,22 \pm 0,01 a
ЕС, μ S	177 \pm 25 a	108 \pm 22 a	623 \pm 167 b	128 \pm 9 a	96 \pm 2 a

Примечание.

* – здесь и в табл. 9 представлены такие почвенные свойства как кислотность (pH_{вод}); содержание органического (C_{орг}) и неорганического углерода (C_{неорг}), легкоподвижного фосфора (P-P₂O₅), нитратного (N-NO₃) и аммонийного азота (N-NH₄), обменной формы калия (K) и магния (Mg); электропроводность (ЕС). Соотношение K/Mg рассчитано на основе атомных масс K и Mg. ** – разные буквы в строках обозначают различие между значениями (на уровне P=0,05, тест Фишера).

Схема опыта. Опыт проводили с картофелем (*Solanum tuberosum* L.) сорта Джелли, включенным в Госреестр с 2005 года (Государственный реестр ..., 2024); сорт среднеранний столового назначения. Минеральные удобрения в трёх вариантах (NP как общий фон, NP+K и NP+K+Mg) вносили на пяти участках по одинаковой (рэндомизированной) схеме в пятикратной повторности. На делянку размером 0,5 \times 0,5 м высаживали по одному откалиброванному клубню, предварительно внося удобрения в дозе 10 г/м² N, 6 г/м² P, по 10 г/м² K и Mg (примерно 100 кг N, 60 кг P, по 100 кг K и Mg на га) в соответствующих схеме опыта комбинациях в виде аммонийной селитры, двойного суперфосфата, хлористого калия и оксида магния. На всех опытных участках агротехника в течение вегетационного сезона была одинаковой.

Выбор вариантов и доз по внесению минеральных удобрений при выращивании картофеля связан с рядом причин:

(1) Уже достаточно давно в научной печати сообщается о нарастающем истощении фонда калия и магния в агропочвах не только легкого, но и более тяжёлого гранулометрического состава (Мазаева, 1977; Прокошев, Дерюгин, 2000; Аристархов, 2002; Якименко, 2003, 2021; Афанасьев, 2005; и др.); эти процессы значительно усиливаются в интенсивных агроценозах с внесением только азотных или азотно-фосфорных удобрений. В этой связи исследования по изучению действия калия на фоне NP-удобрений как отдельно, так и в комбинации с магнием (NP+K+Mg) представляются достаточно актуальными.

(2) Сельскохозяйственные культуры могут испытывать недостаток, в первую очередь, в азотном питании, поэтому в агроценозах чаще всего применяют азотные либо азотно-фосфорные удобрения. В то же время использование только NP-удобрений для калиелюбивых культур (к числу которых относится и картофель) является «большим из зол», чем эксплуатация естественного почвенного плодородия (Якименко, 2003, с. 43). Поэтому в нашем опыте было решено изучить влияние внесения калия и его сочетания с магнием (на фоне NP-удобрений) на продукционный процесс и потребительские свойства картофеля.

(3) Выбор доз минеральных удобрений (N, K и Mg по 100, P – 60 кг д.в./га) основан на результатах длительного полевого опыта на научном стационаре ИПА СО РАН, проводимого В.Н. Якименко на серой лесной среднесуглинистой почве в условиях лесостепи Западной Сибири: оптимальная доза калия при выращивании картофеля столового назначения составила 90–120 кг д.в./га в соотношении N:P:K равном 1:(0,5-0,6):(1-1,2) (Якименко, 2017); оптимальная доза магния составила порядка 20–30 кг/га с совместным внесением калия (90–120 кг/га) на фоне азотно-фосфорных удобрений (N – 90–120, P – 60 кг/га) (Якименко, 2021).

На каждом опытном участке были установлены автоматические регистраторы, записывающие температуру каждые два часа в тени в приземном (2 м от поверхности) слое воздуха, а также в почве на глубине 5 и 15 см. Регистраторы были установлены в двух повторностях на каждом участке. После

обработки записанных показаний по окончании опыта были рассчитаны суммы дневных, ночных и суточных температур (табл. 2) за период вегетации картофеля (с 2–5 июня по 2–5 сентября 2023 года).

Таблица 2

Суммы температур ($^{\circ}\text{C}\times\text{сут}$) воздуха и почвы на опытных участках (среднее \pm стандартное отклонение)

Показатель	Опытный участок				
	У-1	У-2	У-3	У-4	У-5
Воздух, 2 м от поверхности почвы					
Сумма ночных температур	441 \pm 14	407 \pm 2	419 \pm 7	564 \pm 36	397 \pm 7
Сумма дневных температур	1498 \pm 8	1312 \pm 10	1523 \pm 106	1466 \pm 15	1174 \pm 12
Сумма температур	1938 \pm 6	1720 \pm 8	1942 \pm 113	2029 \pm 51	1571 \pm 19
Почва, глубина 5 см					
Сумма ночных температур	505 \pm 12	504 \pm 3	493 \pm 19	581 \pm 34	495 \pm 32
Сумма дневных температур	1252 \pm 23	1182 \pm 125	1071 \pm 131	1314 \pm 69	1053 \pm 67
Сумма температур	1757 \pm 10	1686 \pm 128	1564 \pm 150	1895 \pm 103	1548 \pm 99
Почва, глубина 15 см					
Сумма ночных температур	540 \pm 32	515 \pm 11	496 \pm 11	562 \pm 10	475 \pm 23
Сумма дневных температур	1190 \pm 113	1135 \pm 19	1048 \pm 67	1146 \pm 14	962 \pm 24
Сумма температур	1630 \pm 146	1650 \pm 8	1544 \pm 78	1708 \pm 23	1437 \pm 48

Отбор и анализ почвенных образцов. Образцы почвы из слоя 0–20 см отбирали в начале опыта перед внесением удобрений и посадкой картофеля. Содержание органического ($C_{\text{орг}}$) и неорганического ($C_{\text{неорг}}$) углерода в почве рассчитали по потере массы при ступенчатом прокаливании (Wang et al., 2011). Образцы почвы анализировали стандартными почвенно-агрохимическими методами (Практикум по агрохимии, 2001): содержание нитратного азота (N-NO_3) и легкоподвижного фосфора ($\text{P-P}_2\text{O}_5$) определили в вытяжке 0,015 М K_2SO_4 при соотношении почва:экстрагент равным 1:5; аммонийного азота (N-NH_4) – в вытяжке 0,25 М K_2SO_4 (почва:экстрагент = 1:10); обменной формы калия (K) и магния (Mg) – атомно-абсорбционным методом в вытяжке 1 М $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ (почва:экстрагент = 1:10); кислотность почвы ($\text{pH}_{\text{вод}}$, почва : вода = 1:2,5) и её электропроводность (ЕС) – потенциометрическим методом. Содержание углерода и макроэлементов рассчитали на сухую массу почвы (105°C в течение 6 часов).

Отбор растительных образцов. Отбор образцов надземной и подземной фитомассы провели в конце периода вегетации картофеля при его уборке 2–5 сентября 2023 года. Учитывали массу ботвы, клубней (товарных и нетоварных), число клубней и максимальную массу клубня с каждой делянки. Расчёты надземной и подземной фитомассы картофеля в таблицах представлены на сырую массу.

Органолептический анализ. Кулинарные свойства выращенных клубней картофеля оценивали по таким показателям как вкус, аромат, цвет, рассыпчатость и мучнистость с использованием гедонической шкалы (Kreutzmann et al., 2011) в баллах: оценка 1 балл обозначала «очень не нравится», 2 – «не нравится», 3 – «скорее не нравится», 4 – «ни нравится, ни не нравится», 5 – «скорее нравится», 6 – «нравится» и 7 баллов – «очень нравится». Оценку провела группа экспертов-дегустаторов, состоящая из 5 мужчин и 5 женщин возрастом от 30 до 72 лет (средний возраст $44,4 \pm 13,2$). Для дегустации объединили клубни с 5-ти повторностей каждого варианта на каждом участке, получив таким образом 15 образцов клубней для тестирования (5 участков \times 3 варианта). Для более полного проявления вкуса клубни дегустировали после нескольких месяцев хранения (Jansky, 2008). Клубни варили в кожуре для лучшего сохранения пищевкусных свойств и возможности выявить их различия (Wszelaki et al., 2005); дегустировали остывшими до $45\text{--}50^{\circ}\text{C}$.

Статистический анализ. Статистический анализ проводили с помощью пакета программ Statistica v.13.3 (TIBCO Software Inc., Palo Alto, CA, USA). В общей линейной модели дисперсионного анализа внесение удобрений считали фиксированным фактором, а удаленные друг от друга экспериментальные участки рассматривали как случайный фактор. Регрессионные модели строили методом частных наименьших квадратов (Partial Least Squares, PLS).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Продукция картофеля. Дисперсионный анализ выявил статистически значимое влияние фактора «опытный участок» на все изученные показатели продукции картофеля (табл. 3), при этом фактор обусловил значительную часть дисперсии массы клубней и надземной фитомассы. Напомним, что этот фактор является комбинированным, то есть включает в себя всё разнообразие окружающей среды (от почвенных свойств до погодных условий). Фактор «удобрение» – заметим, означающий внесение только калия и магния, так как во всех вариантах опыта внесено одинаковое количество минеральных азотно-фосфорных удобрений – оказал влияние на массу клубней и общую фитомассу растения; при этом вероятность отсутствия влияния этого фактора на остальные показатели продукции мы считаем незначительной ($0,05 \leq p \leq 0,010$), за исключением отношения надземной фитомассы к массе клубней (см. табл. 3).

Таблица 3

Вклад факторов (%) в дисперсию показателей продукции картофеля

Показатель	Фактор		
	Опытный участок (ОУ)	Удобрение (Уд)	Взаимодействие ОУ × Уд
Число клубней	22 (0,001)*	6 (0,064)	11 (0,240)
Масса клубней	35 (0,000)	8 (0,006)	15 (0,014)
Максимальная масса клубня	23 (0,000)	5 (0,084)	21 (0,006)
Средняя масса клубня	17 (0,009)	6 (0,091)	12 (0,239)
Надземная фитомасса	61 (0,000)	3 (0,090)	4 (0,435)
Общая фитомасса,	51 (0,000)	6 (0,009)	9 (0,057)
Надземная фитомасса/масса клубней	42 (0,000)	1 (0,581)	6 (0,549)

Примечание.

* – вероятность p отсутствия влияния фактора.

Внесение калия на фоне азотно-фосфорных удобрений (вариант NP+K) привело к повышению показателей продуктивности, кроме максимальной массы клубней и соотношения надземной фитомассы к массе клубней (табл. 4). Так, масса клубней на одно растение увеличилась в 1,3 раза по сравнению с вариантом NP и в 1,2 раза по сравнению с вариантом NP+K+Mg. Последний вариант не отличался от варианта NP+K ни по каким показателям, кроме числа и массы клубней: по этим показателям вариант NP+K+Mg оказался близким к варианту NP. Внесение калия увеличило надземную фитомассу в 1,4 раза.

Таблица 4

Структура урожая картофеля при внесении разных удобрений (среднее по всем опытным участкам ± стандартное отклонение, $n=25$ для каждого варианта удобрения)

Показатель	Удобрение		
	NP (контроль)	NP+K	NP+K+Mg
Число клубней, шт./растение	8,0 ± 3,5 a*	9,3 ± 2 b	7,6 ± 2,5 a
Масса клубней, г/растение	767 ± 466 a	1020 ± 427 b	836 ± 388 a
Максимальная масса клубня, г/растение	164 ± 91 a	197 ± 74 ab	208 ± 96 b
Средняя масса клубня, г/растение	89 ± 46 a	114 ± 47 b	111 ± 46 ab*
Надземная фитомасса, г/растение	678 ± 666 a	932 ± 668 b	794 ± 566 ab
Общая фитомасса, г/растение	1405 ± 1021 a	1952 ± 954 b	1629 ± 758 ab*
Отношение надземной фитомассы к массе клубней	1,1 ± 0,8 a	1,0 ± 0,6 a	1,2 ± 1,0 a

Примечание.

* – разные буквы в строках означают, что значения различны ($p \leq 0,05$, НСР-тест Фишера).

Между участками выявлены различия по всем продукционным показателям картофеля, в том числе по соотношению надземной массы к массе клубней (табл. 5).

Таблица 5

Структура урожая картофеля на разных опытных участках (среднее по всем вариантам удобрения на участке ± стандартное отклонение, n=15 для каждого участка)

Показатель	Опытный участок				
	У-1	У-2	У-3	У-4	У-5
Число клубней, шт./растение	8 ± 2 ab*	9 ± 3 bc	10 ± 4 c	6 ± 1 a	9 ± 2 bc
Масса клубней, г/растение	738 ± 382 b	806 ± 441 b	1242 ± 448 c	483 ± 189 a	1034 ± 288 c
Максимальная масса клубня, г/растение	176 ± 72 ab	194 ± 104 b	266 ± 86 c	140 ± 61 a	171 ± 68 ab
Средняя масса клубня, г/растение	96 ± 46 ab	90 ± 44 ab	134 ± 52 c	84 ± 41 a	120 ± 34 bc
Надземная фитомасса, г/растение	666 ± 343 b	550 ± 288 ab	1734 ± 750 c	757 ± 247 b	299 ± 130 a
Общая фитомасса, г/растение	1404 ± 557 a	1356 ± 703 a	2976 ± 1073 b	1239 ± 427 a	1334 ± 367 a
Отношение надземной фитомассы к массе клубней	1,2 ± 1,1 b	0,7 ± 0,2 a	1,5 ± 0,7 b	1,7 ± 0,4 b	0,3 ± 0,1 a

Примечание.

* – разные буквы в строках обозначают различие между значениями (на уровне P=0,05, тест Фишера).

Анализ методом главных компонент матрицы почвенных свойств и матрицы продукционных показателей картофеля выявил чёткое группирование опытных участков в пространстве первых двух главных компонент по почвенным свойствам (рис. 1, А) и значительно менее чёткое группирование – по продукционным показателям участков (рис. 1, Б).

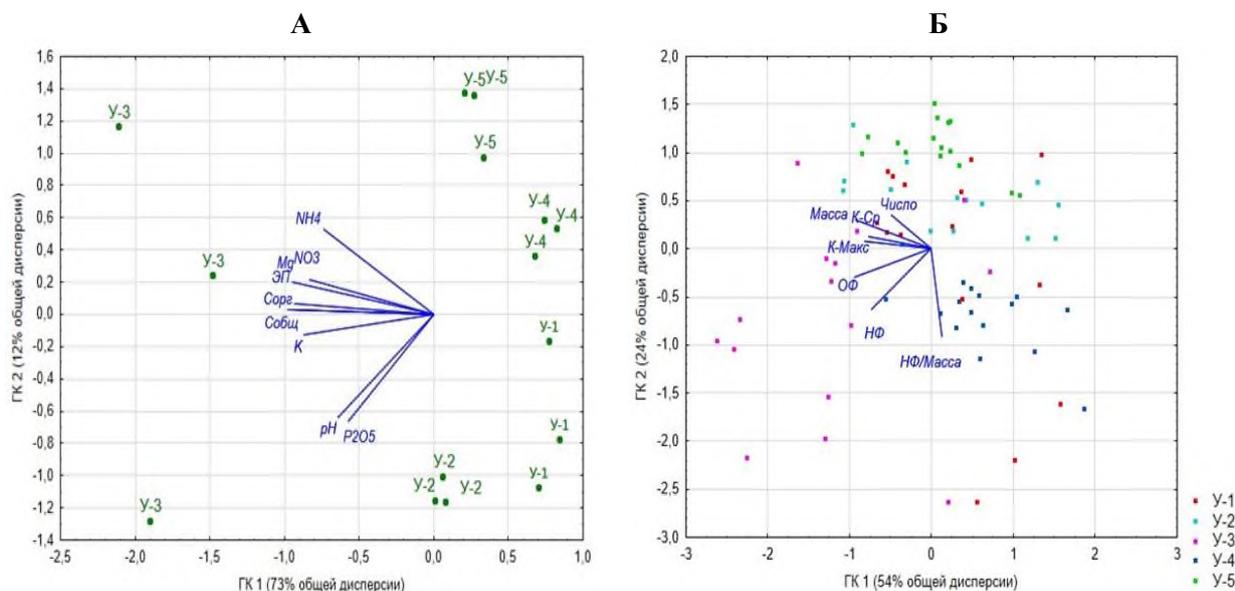


Рисунок 1. Расположение опытных участков в плоскости первых двух главных компонент (ГК 1 и ГК 2) при анализе почвенных свойств до начала опыта (А) и продукционных показателей картофеля (Б). Обозначения: У-1 ... У-5 – разные опытные участки. Почвенные свойства: реакция среды (pH); содержание органического (C_{орг}) и общего углерода (C_{общ}), легкоподвижного фосфора (P₂O₅), нитратного (NO₃) и аммонийного азота (NH₄), обменной формы калия (К) и магния (Mg); электропроводность (ЭП). Продукционные показатели: Число – количество клубней с одного растения; Масса – масса клубней с одного растения; К-Ср и К-Макс – средняя и максимальная масса клубня на растении, соответственно; ОФ и НФ – общая и надземная фитомасса, соответственно.

Оценка кулинарного качества клубней. Оба фактора, т.е. «опытный участок» и «удобрение» (подразумевается только К и Mg на фоне NP-удобрений), внесли весьма незначительный вклад в общую дисперсию свойств, в том числе в случаях, когда влияние фактора оказалось статистически значимым (табл. 6). На уровне 0,05 ≤ p ≤ 0,010 мы считаем значимым влияние фактора «опытный

участок» на вкус и рассыпчатость клубней, а фактора «удобрение» на их рассыпчатость, исходя из того, что в этих случаях объём выборки оказался несколько недостаточным для достижения уровня $p \leq 0,05$.

Таблица 6

Вклад факторов (%) в дисперсию оценки кулинарных свойств клубней картофеля

Показатель	Фактор		
	Опытный участок (ОУ)	Удобрение (Уд)	Взаимодействие ОУ × Уд
Вкус	6 (0,068)*	5 (0,032)	4 (0,681)
Аромат	6 (0,003)	3 (0,011)	1 (0,984)
Цвет	10 (0,005)	1 (0,125)	2 (0,914)
Рассыпчатость	6 (0,066)	4 (0,065)	4 (0,704)
Мучнистость	2 (0,736)	3 (0,300)	8 (0,125)

Примечание.

* – в скобках указана вероятность отсутствия влияния фактора.

Оценка всех кулинарных свойств клубней, за исключением цвета, была выше в варианте NP+K+Mg по сравнению с вариантом NP+K, который не отличался от варианта NP (табл. 7).

Таблица 7

Оценка кулинарных свойств клубней картофеля (средний балл ± стандартное отклонение)

Показатель	Удобрение		
	NP	NP+K	NP+K+Mg
Вкус	4,8 ± 1,3 ab*	4,5 ± 1,5 a	5,3 ± 1,2 b
Аромат	5,2 ± 1,1 ab	4,9 ± 1,4 a	5,3 ± 1,1 b
Цвет	5,1 ± 1,1 a	5,1 ± 1,3 a	5,4 ± 1,2 a
Рассыпчатость	4,7 ± 1,4 ab	4,5 ± 1,4 a	5,1 ± 1,1 b
Мучнистость	4,6 ± 1,3 ab	4,4 ± 1,3 a	4,9 ± 1,2 b

Примечание.

* – разные буквы в строках обозначают различие между значениями (на уровне $P=0,05$, тест Фишера).

Фактор «опытный участок» оказал влияние на органолептическую оценку всех свойств клубней картофеля (особенно на вкус) за исключением мучнистости (табл. 8).

Таблица 8

Органолептическая оценка клубней картофеля с разных опытных участков ± стандартное отклонение)

Показатель	Опытный участок				
	У-1	У-2	У-3	У-4	У-5
Вкус	4,2 ± 1,5 a*	5,1 ± 1,4 b	5,2 ± 1,3 b	5,0 ± 1,2 b	4,9 ± 1,3 b
Аромат	4,6 ± 1,5 a	5,0 ± 1,3 ab	5,5 ± 1,0 b	5,3 ± 1,0 b	5,2 ± 1,1 ab
Цвет	4,6 ± 1,7 a	5,5 ± 1,0 b	5,6 ± 1,0 b	5,0 ± 0,9 ab	5,3 ± 0,9 b
Рассыпчатость	4,7 ± 1,4 a	4,7 ± 1,4 a	5,4 ± 1,1 b	4,7 ± 1,1 a	4,4 ± 1,3 a
Мучнистость	4,4 ± 1,6 a	4,7 ± 1,4 a	4,9 ± 1,1 a	4,5 ± 1,0 a	4,5 ± 1,4 a

Примечание.

* – разные буквы в строках обозначают различие между значениями (на уровне $P=0,05$, тест Фишера).

Регрессия методом частных наименьших квадратов, проведённая для выявления роли почвенных свойств и температурных показателей в определении продукционных и кулинарных характеристик картофеля, позволила получить представленные в таблице 9 коэффициенты. По величине модуля этих коэффициентов можно судить о значимости вклада предикторов в предсказание величины зависимой переменной.

Таблица 9

Стандартизованные коэффициенты регрессии (методом частных наименьших квадратов) продукционных и кулинарных свойств картофеля

Предиктор	Зависимая переменная				
	Масса клубней	Надземная фитомасса	Вкус	Аромат	Цвет
Регрессия с почвенными свойствами					
pH _{вод}	0,64¹	-0,12	-0,99	-1,03	-0,49
Сорт	-0,24	0,19	0,89	0,70	0,64
P-P ₂ O ₅	-0,26	0,02	0,85	0,33	0,70
N-NO ₃	-0,60	0,64	0,68	0,84	0,19
N-NH ₄	0,61	-0,31	0,07	0,01	0,33
K	0,24	0,22	-0,30	-0,07	-0,22
Mg	0,76	-0,24	-0,43	0,40	0,02
ЕС	-0,05	0,43	-0,18	-0,11	-0,28
Регрессия с суммами температур					
T _{воздуха} , день	0,29	0,62	-0,03	0,22	-0,02
T _{воздуха} , ночь	-0,12	0,03	0,09	0,32	-0,05
T _{воздуха} , сутки	0,19	0,51	0,03	0,30	-0,01
T _{почвы 5 см} , день	-0,40	0,65	-1,13	-0,86	-1,06
T _{почвы 5 см} , ночь	0,09	-0,17	0,84	0,71	0,63
T _{почвы 5 см} , сутки	-0,34	-0,47	-0,67	-0,50	-0,67
T _{почвы 15 см} , день	-0,19	-0,26	-0,58	-0,69	-0,47
T _{почвы 15 см} , ночь	-0,26	-0,34	-0,73	-0,52	-0,70
T _{почвы 15 см} , сутки	0,15	0,74	2,03	1,05	1,87

Примечание.

Жирным шрифтом выделены по три наибольших по модулю коэффициента для каждого показателя, что соответствует вкладу предикторов в регрессионную модель.

ОБСУЖДЕНИЕ

Средний по всем участкам и вариантам опыта урожай картофеля составил $0,86 \pm 0,44$ кг клубней на одно растение с делянки площадью $0,25 \text{ м}^2$, что эквивалентно $3,44 \text{ кг/м}^2$ или $34,4 \text{ т/га}$. Это в два раза выше, чем средняя по всем хозяйствам страны урожайность в 2022 г., составившая $17,4 \text{ т/га}$ (FAOSTAT ..., 2024), но близко к урожаям, полученным рядом исследователей в Новосибирской (Галеев и др., 2021; Якименко, 2021) и Воронежской областях (Верховцева и др., 2023), лесостепи Среднего Поволжья (Артамонов и др., 2019), а также в Чехии (Hlisnikovský et al., 2021) и Корее (Bak et al., 2024). В нашей работе в варианте с внесением NPK-удобрений (т.е. без магния), масса клубней с одного растения (тоже среднераннего сорта) была в точности такая же, как в аналогичном по удобренности варианте в Белоруссии (Талашова, 2019).

Проведённый опыт, как и ожидали, выявил увеличение почти всех продукционных показателей картофеля при внесении калия на фоне NP-удобрений. Известно, что внесение калийного удобрения стимулирует транслокацию фотоассимилятов в клубни, повышая их продукцию (Beringer et al., 1983). Однако такое же количество калия, но внесённое вместе с магнием (NP+K+Mg), привело к увеличению только максимальной массы клубня по сравнению с вариантом NP, не вызвав соответствующего увеличения других показателей. Этот результат позволяет предположить, что внесение магния и динамика его доступности стимулировали процессы, для поддержки которых калия оказалось недостаточно. Косвенно об этом свидетельствует и выявленный факт несколько лучших потребительских свойств клубней при внесении магния. Картофель имеет довольно поверхностную и слабо разветвленную корневую систему (Меркушева и др., 2004; Dechassa et al., 2003; Hopkins, Hansen, 2019; Kirchgesser et al., 2023), охватывающую небольшой объём почвы для извлечения воды и питательных элементов, из-за чего является не очень эффективной культурой в этом плане (Hopkins et al., 2014). Поэтому внесённый в слаборастворимой форме оксида магний мог оставаться доступным для растений дольше калия, внесённого в виде хорошо растворимого хлорида; возможно, что ионы калия расходились по компонентам и процессам круговорота элемента в почве и/или вымывались осадками из корнеобитаемого слоя ещё до заметного развития подземной части растений. В связи с этим динамика соотношения калия и магния в доступной форме могла оказаться менее благоприятной для продукции клубней в почве варианта с внесением NP+K+Mg. Весьма вероятно, что такой механизм лежал в основе проявления действия атмосферных осадков на эффективность внесённых удобрений, в

том числе магния (тоже в виде оксида), в длительном (с 1962 г.) полевом опыте в Венгрии (Márton, 2004). Есть и другие исследования, не выявившие влияния внесения магния на продукцию клубней (Скрябин, 2023; Assunção et al., 2020; Osowski et al., 2017). Следует отметить, что действие удобрений в зависимости от температуры также отражается на продуктивности клубней и надземной фитомассы картофеля (Nielsen et al., 1961).

Несмотря на заметный эффект от внесения калия на урожай клубней (повышение на 30%), вклад фактора удобрений в общее варьирование продукционных показателей картофеля не превышал 10%. Это в значительной степени связано с тем, что во всех вариантах опыта было внесено одинаковое количество азотно-фосфорных удобрений (фон), а то, что мы назвали для краткости фактором удобрения, обозначает только дополнительное внесение калия и магния; поэтому и неудивительно небольшое варьирование, обусловленное этими элементами.

Напомним, что фактор «опытный участок» включает совместное действие разных факторов окружающей среды – эдафических и погодных. Если некоторые факторы – почвенные и температурные – мы определили, то осадки и фотосинтетически активную радиацию (ФАР) солнца не измеряли в связи с отсутствием соответствующих регистрирующих приборов. Полученные результаты позволяют предположить, что именно осадки и фотосинтетически активная солнечная радиация были основными факторами, варьирование которых в пределах градиента расположения опытных участков внесло основной вклад в варьирование продукционных особенностей картофеля в рассматриваемом опыте. В этой связи необходимо подчеркнуть, что одним из основных требований к полевому опыту традиционно и обоснованно является его стационарное проведение по одной и той же схеме в течение минимум трёх-четырёх лет именно для того, чтобы оценить влияние меняющихся год от года погодных условий на изучаемый показатель продукции той или иной сельскохозяйственной культуры на фоне одних и тех же почвенных свойств. При этом, строго говоря, полученные результаты относятся только к почвам со свойствами, близкими к таковым в почве опыта. Замена такого временного градиента пространственным – а это является стандартной практикой экологических исследований, позволяющей оценить скорость сукцессии, например, на отвалах или залежах разного возраста (Титлянова и др., 1988; Миллер и др., 2023) – позволила не только установить действие внесения калия на фоне NP-удобрений как отдельно, так и в комбинации с магнием (NP+K+Mg), но и распространить полученный результат на другие почвы со свойствами в пределах изученного в опыте диапазона.

Заметим, что по итогам опыта в Чехии на трёх участках четыре года подряд также выявлено заметно большее влияние месторасположения опытных участков на урожай картофеля (Hlisnikovský et al., 2021); при этом внесение удобрений (навоза, NPK) по степени влияния на урожай находилось после погодных условий. В том исследовании, в отличие от нашей работы, учитывали и осадки, и температуру, но не оценивали варьирование фотосинтетически активной радиации между участками и годами, которая, на наш взгляд, является одним из основных факторов, определяющих продуктивность растений. В целом, наши результаты свидетельствуют, что картофель является культурой, весьма чувствительной к почвенно-погодным условиям произрастания; это подчеркивают и другие исследователи (Кириллова, Жуков, 2005; Убугунов, Меркушева, 2019; Chang et al., 2018; Osowski et al., 2017).

Оценка общей биологической продукции любых сельскохозяйственных культур важна как для оценки физиологического состояния растений (в том числе отношения фотосинтезирующей фитомассы к массе товарной продукции), так и для оценки выноса растениями питательных элементов и возможного заметного (в зависимости от культуры и технологии возделывания) их отчуждения из почвенной экосистемы. В нашем опыте соотношение надземной фитомассы картофеля к массе клубней было одинаковым по разным вариантам опыта. Однако заметная разница по этому показателю между некоторыми участками также может косвенно говорить о разнице по ФАР.

Выявленная наибольшая зависимость прогнозируемой продукции клубней от содержания обменного магния в почве перед началом опыта связана, вероятнее всего, с участием этого элемента в процессах фотосинтеза и транслокации фотоассимилятов в клубни. Положительная зависимость величины подземной и надземной продукции картофеля от суммы дневных температур воздуха может свидетельствовать о стимулировании роста (и, как можно предположить, фотосинтеза) растений более высокой температурой. В то же время, транслокация фотоассимилятов в подземную сферу могла быть несколько снижена более высокой температурой почвы в слое 0–5 см, о чём свидетельствует отрицательный коэффициент в уравнении регрессии продукции клубней с температурными характеристиками (см. табл. 9). Хотя в течение вегетации были краткие периоды с нетипично высокими для региона дневными температурами 36–38°C и выше, что могло замедлить образование и

рост клубней (Koch et al., 2024), в целом за вегетационный сезон температура воздуха не оказывала отрицательного воздействия на рост надземной фитомассы картофеля или же оно могло быть компенсировано более благоприятными (по количеству и распределению в сезоне) осадками (Hlisnikovský et al., 2021).

Несмотря на быстрый прогресс и увеличение доступности хроматографических, спектральных, протеомных, метаболомных и других методов анализа химического состава сельскохозяйственной продукции, они не отменяют и даже повышают необходимость оценки потребительских свойств продукции путём дегустации (Vechoff et al., 2023); в современных программах селекции картофеля стараются сбалансировать агрономические свойства сортов с потребительскими (Drapal et al., 2022). В последние годы с появлением новых сортов активнее стали изучать влияние окружающей среды и разных агрономических технологий возделывания, в том числе систем удобрения, на кулинарное и пищевое качество картофеля (Bražinskienė et al., 2014; Li et al., 2023). В нашей работе выявлено значительное увеличение вкусовых свойств клубней при дополнительном внесении магния по сравнению с вариантом с внесением только калия на фоне азотно-фосфорных удобрений: это совпадает с результатами, полученными польскими исследователями тоже на среднераннем сорте (Retmańska et al., 2023).

Выявленную в нашем опыте зависимость потребительских свойств клубней от содержания органического углерода в почве (положительную) и величины $pH_{\text{вод}}$ (отрицательную) сравнить с другими результатами не смогли, так как подобных работ найти не удалось. Есть, однако, опубликованные результаты исследований о влиянии почвенных свойств на биохимические свойства клубней: например, с использованием (как и в нашей работе) регрессии методом частных наименьших квадратов показана ведущая роль pH почвы в формировании полезных биохимических свойств клубней (Xing et al., 2020). Однако сравнивать наши результаты с данными этого и подобных исследований трудно, так как биохимические свойства не транслируются напрямую в органолептические; в дополнение к этому, указанная работа была выполнена на сильнощелочных почвах в узком диапазоне с pH выше 8.

Наличие положительной зависимости вкуса и цвета клубней картофеля от содержания легкоподвижного фосфора в почвах нашего опыта связано, по-видимому, с тем, что фосфатная группа входит в состав крахмала и вторичных метаболитов. Полученные нами результаты, показывающие, что кулинарные качества картофеля во многом определяются особенностями культивирования, месторасположением участков и погодными условиями, согласуются с данными ряда зарубежных авторов (Hajslova et al., 2005; Ierna et al., 2022), а также накопленным большим практическим опытом выращивания картофеля в нашей стране. Взаимосвязь же конкретных почвенных свойств с потребительской оценкой клубней, выращиваемых на агросерой почве региона, показана впервые.

Следует подчеркнуть, что в опыте мы использовали только один сорт картофеля, а именно Джелли; полученные результаты как по потребительским свойствам, так и по продукционным особенностям, относятся к этому сорту или другим среднеранним сортам картофеля с белоокрашенными клубнями, т.к. гетерогенность сортов по продукционным характеристикам растений и биохимическим свойствам клубней достаточно велика (Ierna et al., 2022; Nantongo et al., 2023); учитывая большое мировое разнообразие сортов картофеля – более 5000 (Food ..., 2023), учёт сортовой специфики имеет важное значение и в проводимых исследованиях, и в практическом растениеводстве.

ВЫВОДЫ

1. Внесение калия на фоне азотно-фосфорных удобрений (N100P60+K100) повысило урожай клубней картофеля (среднеранний сорт Джелли) на 30%, а надземной фитомассы – на 40%
2. Дополнительное внесение магния (N100P60+K100+Mg100) не оказало влияния на продукционные показатели картофеля, однако заметно повысило пищевое качество клубней.
3. Более половины дисперсии продукционных показателей картофеля связано с различием почвенно-экологических условий опытных участков. Основными почвенными свойствами, позволяющими спрогнозировать продуктивность культуры, были содержание обменного магния, аммонийного азота, а также реакция среды ($pH_{\text{вод}}$).
4. Вклад почвенно-экологических условий опытных участков в дисперсию оценок потребительских свойств клубней был весьма незначителен, но, тем не менее, статистически значим для аромата и цвета ($p \leq 0,05$) с аналогичным трендом для вкуса и рассыпчатости ($0,05 \leq p \leq 0,10$). Агрехимические свойства почв – содержание органического углерода, легкоподвижного фосфора и

нитратного азота, а также реакция среды, были определяющими в прогностической модели потребительских свойств будущего урожая.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённые исследования на агросерых почвах в лесостепной зоне Западной Сибири подтвердили важность оптимизации минерального питания картофеля, в значительной степени обуславливающего урожайность и пищевкусовое качество клубней. Внесение сбалансированных доз НРК удобрений существенно повышало продуктивность выращиваемого картофеля по сравнению с использованием только NP; дополнительное к НРК внесение Mg не приводило к дальнейшему росту урожайности, однако заметно улучшало кулинарные свойства клубней.

Определённые различия в эффективности вносимых калия и магния связаны, очевидно, с неодинаковым относительным содержанием доступных форм этих элементов в исследуемых почвах (обеспеченность калием варьировала от низкой до повышенной, магнием – от средней до очень высокой), а также тем обстоятельством, что вынос (потребление) картофелем калия примерно в 20 раз превышает вынос магния. В этой связи ожидаемы результаты статистического анализа полученных экспериментальных данных, свидетельствующие о тесной зависимости продуктивности картофеля (и, в заметной степени, качества клубней) от почвенных свойств (эффективное плодородие) и погодных условий вегетационного периода (температура почвы и воздуха). Принимая во внимание тот факт, что предсказание погодных условий на среднесрочную и длительную перспективу представляется в настоящее время трудно выполнимой задачей, определение агрохимических показателей почвы перед началом вегетационного периода может реально способствовать адекватной прогностической оценке величины и качества будущего урожая.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность ведущим инженерам Института почвоведения и агрохимии СО РАН Бугровской Г.А. и Крыловой А.А. за помощь в проведении полевых и лабораторно-аналитических работ.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа проведена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № 121031700309-1).

ЛИТЕРАТУРА

- Аверкина С.С., Науменко И.В. Изучение агрохимии фосфора на почвах Западной Сибири // Инновации и продовольственная безопасность. 2017. № 2 (16). С. 49–70.
- Агрохимические свойства почв и эффективность удобрений / Гамзиков Г.П., Ильин В. Б., Назарюк В.М. и др. Новосибирск: Наука. Сибирское отделение, 1989. 254 с.
- Аристархов А.Н. Агрохимическое обоснование применения магниевых удобрений // Плодородие. 2002. № 2 (5). С. 15–17.
- Артамонов С.Г., Владимиров В.П., Мостякова А.А. Формирование урожая и качество клубней среднераннего картофеля сорта Гала в зависимости от вносимых доз калийных удобрений на серой лесной почве лесостепи Среднего Поволжья // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2019. Том 14. № 2 (53). С. 10–14. https://doi.org/10.12737/article_5d3e161e6aba99.12538029
- Верховцева Н.В., Лукьянова М.В., Кочетков И.М., Кубарев Е.Н. Оценка воздействия препаратов с физиологически активными свойствами на антиоксидантные свойства картофеля *Solanum tuberosum* L. (на примере аскорбиновой кислоты) // Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение. 2023. Том 78. № 2. С. 56–62. <https://doi.org/10.55959/MSU0137-0944-17-2023-78-2-56-62>
- Галеев Р.Р., Ковалев Е.А., Шульга М.С. Урожайность и качество картофеля в зависимости от применения микроэлементов в северной лесостепи Новосибирского Приобья // Вестник Новосибирского государственного аграрного университета. 2021. № 1 (58). С. 27–35. <https://doi.org/10.31677/2072-6724-2021-58-1-27-35>
- Государственный реестр селекционных достижений, допущенных к использованию. Том 1. Сорты растений. 2024. URL: <https://gossortrf.ru/registry/gosudarstvennyy-reestr-selektсионnykh-dostizheniy-dopushchennykh-k-ispolzovaniyu-tom-1-sorta-rasteni/dzhelli-kartofel/> (дата обращения 12.03.2024).
- Классификация и диагностика почв России / Авторы и составители: Л.Л. Шишов, В.Д. Тонконогов, И.И. Лебедева, М.И. Герасимова. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.

- Кириллова Г.Б., Жуков Ю.П. Влияние различных доз удобрений на урожайность и качество картофеля // *Агрохимия*. 2005. № 12. С. 31–35.
- Меркушева М.Г., Убугунов Л.Л., Гармаев С.Р., Болонева Л.Н. Биопродуктивность и химический состав растений картофеля на аллювиальной луговой почве при применении минеральных удобрений в Забайкалье // *Агрохимия*. 2004. № 10. С. 22–26.
- Методические указания по проведению комплексного мониторинга плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения. Москва: ФГНУ «Росинформагротех», 2003. 240 с.
- Миллер Г.Ф., Соловьев С.В., Безбородова А.Н. Почвенно-экологическая оценка разновозрастных залежей юго-востока Западной Сибири // *Почвы и окружающая среда*. 2023. Том 6. № 4. e230. <https://doi.org/10.31251/pos.v6i4.230>
- Практикум по агрохимии. 2-е издание, переработанное и дополненное / Под ред. академика РАСХН В.Г. Минеева. Москва: Издательство МГУ, 2001. 689 с.
- Скрябин И.А. Содержание магния в листьях и клубнях картофеля в зависимости от некорневой подкормки удобрением сульфат магния в условиях Среднего Предуралья // *Дневник науки*. 2023. №12 (84).
- Талашова А.В. Качественные характеристики урожая среднераннего картофеля при комплексном применении удобрений и орошения // *Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии*. 2019. № 4. С. 143–147.
- Титлянова А.А., Миронычева-Токарева Н.П., Наумова Н.Б. Круговорот углерода в травных экосистемах при зарастании отвалов // *Почвоведение*. 1988. № 7. С. 164–174.
- Тихомирова В.Я. Влияние свойств почв, удобрений, извести и погодных условий на обеспеченность магнием сельскохозяйственных растений // *Агрохимия*. 2011. № 5. С. 84–89.
- Убугунов Л.Л., Меркушева М.Г. Удобрение картофеля. Новосибирск: СО РАН: Наука, 2019. 264 с. <https://doi.org/10.7868/978-5-02-038799-7>
- Центр Агроаналитики. В России собрали самый высокий урожай картофеля за 30 лет. Дата публикации 09.01.2024. [Электронный ресурс]. URL: <https://specagro.ru/news/202401/v-rossii-sobrali-samy-vysokiy-urozhay-kartofelya-za-30-let> (дата обращения 13.04.2024).
- Шпаар Д., Быкин А., Дрегер Д. Картофель. Минск: ЧУП «Орех», 2004. 465 с.
- Якименко В.Н. Калий в агроценозах Западной Сибири. Новосибирск: Издательство СО РАН, 2003. 231 с.
- Якименко В.Н. Эффективность уровня калийного питания картофеля // *Плодородие*. 2005. № 5 (26). С. 11–13.
- Якименко В.Н. Зависимость урожайности и качества картофеля от уровня калийного питания // *Плодородие*. 2017. № 4 (97). С. 6–10.
- Якименко В.Н. Взаимовлияние калия и магния при выращивании картофеля на серой лесной почве // *Агрохимия*. 2021. № 6. С. 8–15. <https://doi.org/10.31857/S0002188121050136>
- Assunção N.S., Ribeiro N.P., da Silva R.M., Soratto R.P., Fernandes A.M. Tuber yield and allocation of nutrients and carbohydrates in potato plants as affected by limestone type and magnesium supply // *Journal of Plant Nutrition*. 2020. Vol. 43. No. 1. P. 51–63. <https://doi.org/10.1080/01904167.2019.1659345>
- Bak G.R., Lee K.K., Clark I.M., Mauchline T.H., Kavamura V.N., Lund G., Jee S., Lee J.T., Kim H., Lee Y.H. The potato rhizosphere microbiota correlated to the yield of three different regions in Korea // *Scientific Reports*. 2024. Vol.14. No. 1. P. 4536. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-55263-7>
- Bechhoff A., Adinsi L., Ngoh Newilah G., Nakitto M., Deucher Z., Ssali R., Chijioke U., Khakasa E., Nowakunda K., Bouniol A., Dufour D., Bugaud C. Combined use of sensory methods for the selection of root, tuber and banana varieties acceptable to end-users // *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2023. <https://doi.org/10.1002/jsfa.12723>
- Beringer H., Haeder H.E., Lindhauer M. Water relationships and incorporation of C assimilates in tubers of potato plants differing in potassium nutrition // *Plant Physiology*. 1983. Vol. 73. No. 4. P. 956–960. <https://doi.org/10.1104/pp.73.4.956>
- Bražinskienė V., Asakaviciute R., Miezelienė A., Alencikiene G., Ivanauskas L., Jakstas V., Viskelis P., Razukas A. Effect of farming systems on the yield, quality parameters and sensory properties of conventionally and organically grown potato (*Solanum tuberosum* L.) tubers // *Food Chemistry*. 2014. Vol. 145. P. 903–909. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.09.011>
- Chang D.C., Jin Y.K., Nam J.H., Cheon C.G., Cho, J.H., Kim S.J. Early drought effect on canopy development under growth of potato cultivars with different maturities // *Field Crops Research*. 2018. Vol. 215. P. 156–162. <https://doi.org/doi.org/10.1016/j.fcr.2017.10.008>

- Dechassa N., Schenk M.K., Claassen N., Steingrobe B. Phosphorus efficiency of cabbage (*Brassica oleraceae* L. var. capitata), Carrot (*Daucus carota* L.), and Potato (*Solanum tuberosum* L.) // Plant and Soil. 2003. Vol. 250. P. 215–224. <https://doi.org/10.1023/A:1022804112388>
- Drapal M., De Boeck B., Kreuze H.L., Bonierbale M., Fraser P.D. Identification of metabolites associated with boiled potato sensory attributes in freshly harvested and stored potatoes // Journal of Food Composition and Analysis. 2022. Vol. 115. P. 104934. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2022.104934>
- FAOSTAT. Data. Crops and livestock products, potatoes. Food and Agriculture organization of the United Nations, 2024. [Electronic resource]. URL: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL> (accessed on 13.04.2024).
- Food and Agriculture Organization of the United Nation. International Day of Potato. 30 May 2023. [Electronic resource]. URL: <https://www.fao.org/international-potato-day/en> (accessed on 06.05.2024).
- Hlisnikovský L., Menšík L., Kunzová E. The Effect of Soil-Climate Conditions, Farmyard Manure and Mineral Fertilizers on Potato Yield and Soil Chemical Parameters // Plants. 2021. Vol. 16. No. 10 (11). P. 2473. <https://doi.org/10.3390/plants10112473>
- Hajslova J., Schulzova V., Slanina P., Janne K., Hellenas K. E., Andersson C. Quality of organically and conventionally grown potatoes: Four-year study of micronutrients, metals, secondary metabolites, enzymic browning and organoleptic properties // Food Additives and Contaminants. 2005. Vol. 22. No. 6. P. 514–534. <https://doi.org/10.1080/104403905000919825>
- Hopkins B.G., Horneck D.A., MacGuidwin A.E. Improving phosphorus use efficiency through potato rhizosphere modification and extension // American Journal of Potato Research. 2014. Vol. 91. P.161–174. <https://doi.org/10.1007/s12230-014-9370-3>
- Hopkins B.G., Hansen N.C. Phosphorus Management in High-Yield Systems // Journal of environmental quality. 2019. Vol. 48. P. 1265–1280. <https://doi.org/10.2134/jeq2019.03.0130>
- Ishfaq M., Zhong Y., Wang Y., Li X. Magnesium Limitation Leads to Transcriptional Down-Tuning of Auxin Synthesis, Transport, and Signaling in the Tomato Root // Frontiers in Plant Science. 2021. Vol. 23. No. 12. P. 802399. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.802399>
- Ierna A., Melilli M.G., Parisi B. Sensory characteristics of raw and cooked “early” potato tubers as affected by organic cultivation // Acta Hort. 2022. No. 1354. P. 375–382. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2022.1354.49>
- Jansky S.H. Genotypic and Environmental Contributions to Baked Potato Flavor. American Journal of Potato Research. 2008. Vol. 85. No. 6. P. 455–465. <https://doi.org/10.1007/s12230-008-9053-z>
- Kirchgesser J., Hazarika M., Bachmann-Pfabe S., Dehmer K.J., Kavka M., Uptmoor R. Phenotypic variation of root-system architecture under high P and low P conditions in potato (*Solanum tuberosum* L.) // BMC Plant Biology. 2023. Vol. 23. No. 1. P. 68. <https://doi.org/10.1186/s12870-023-04070>
- Knoblauch H.C., Ödland T.E. A magnesium deficiency induced by previous fertilizer treatments // Journal of the American Society of Agronomy. 1934. Vol. 26. No. 7. P. 609–615. <https://doi.org/10.2134/agronj1934.00021962002600070010x>
- Koch L., Lehretz G.G., Sonnewald U., Sonnewald S. Yield reduction caused by elevated temperatures and high nitrogen fertilization is mitigated by SP6A overexpression in potato (*Solanum tuberosum* L.) // Plant Journal. 2024. Vol. 117. No. 6. P. 1702–1715. <https://doi.org/10.1111/tpj.16679>
- Koch M., Busse M., Naumann M., Jákli B., Smit I., Cakmak I., Hermans C., Pawelzik E. Differential effects of varied potassium and magnesium nutrition on production and partitioning of photoassimilates in potato plants // Physiologia plantarum. 2019. Vol. 166. No. 4. P. 921–935. <https://doi.org/10.1111/ppl.12846>
- Koch M., Naumann M., Pawelzik E., Gransee A., Thiel H. The Importance of Nutrient Management for Potato Production Part I: Plant Nutrition and Yield // Potato Research. 2020a. Vol. 63. P. 97–119. <https://doi.org/10.1007/s11540-019-09431-2>
- Koch M., Winkelmann M. K., Hasler M., Pawelzik E., Naumann M. Root growth in light of changing magnesium distribution and transport between source and sink tissues in potato (*Solanum tuberosum* L.) // Scientific Reports. 2020b. Vol. 10. No. 1. P. 8796. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-65896-z>
- Kreutzmann S., Bassompierre M., Thybo A.K., Buch L., Engelsens S.B. Exploratory Study of Potato Cultivar Differences in Sensory and Hedonistic Applicability Tests // Potato Research. 2011. Vol. 54. No. 1. P. 13–28. <https://doi.org/10.1007/s11540-010-9168-8>
- Li K., Li M., Zhou J., Guo H. The Impact of the Individual and Combined Application of Phosphorus and Sulfur Fertilizers on Potato Tuber Flavor // Foods. 2023. Vol. 12. No. 20. P. 3764. <https://doi.org/10.3390/foods12203764>

- Márton L. Fertilisation, rainfall and crop yield // Acta Agronomica Academiae Scientiarum Hungaricae. 2004. Vol. 52. No. 2. P. 165–172. <https://doi.org/10.1556/AAgr.52.2004.2.7>
- Nantongo J.S., Tinyiro S.E., Nakitto M., Serunkuma E., Namugga P., Ayetigbo O., Mayanja S., Moyo M., Ssali R., Mendes T. End-user preferences to enhance prospects for varietal acceptance and adoption in potato breeding in Uganda // Journal of the Science of Food and Agriculture. 2023. <https://doi.org/10.1002/jsfa.12882>
- Nielsen K.F., Halstead R.L., MacLean A.J., Bourget S. J., Holmes, R.M. The Influence of Soil Temperature on the Growth and Mineral Composition of Corn, Bromegrass and Potatoes // Soil Science Society of America Journal. 1961. Vol. 25. No. 5. P. 369–372. <https://doi.org/10.2136/sssaj1961.03615995002500050019x>
- Osowski J., Erlichowski T., Urbanowicz J. Wpływ nawożenia potasem, magnezem i siarką na plonowanie, ciemnienie bulw surowych oraz występowanie alternariozy i ospowatości bulw ziemniaka [The effect of potassium, magnesium and sulphur fertilization on the yield, raw tuber darkening and occurrence of black scurf and early blight of potato tubers] // Fragm. Agron. 2017. Vol. 34. No. 1. P. 49–59. URL: [https://pta.up.poznan.pl/pdf/2017/FA%2034\(1\)%202017%20Osowski.pdf](https://pta.up.poznan.pl/pdf/2017/FA%2034(1)%202017%20Osowski.pdf) (accessed on 17.04.2024).
- Retmańska K., Pobereźny J., Wszelaczyńska E., Gościnną K., Ropińska P. Organoleptic characteristics and the total glycoalkaloid content of edible potato tubers depending on a cultivation technology and storage // Journal of Elementology. 2023. Vol. 28. No. 1. P. 7–25. <https://doi.org/10.5601/jelem.2022.27.4.2359>
- Singh B., Goutam U., Kukreja S., Sharma J., Sood S., Bhardwaj V. Potato biofortification: an effective way to fight global hidden hunger // Physiology and Molecular Biology of Plants. 2021. Vol. 27. No. 10. P. 2297–2313. <https://doi.org/10.1007/s12298-021-01081-4>
- Tein B., Kauer K., Ereemeev V., Luik A., Selge A., Loit E. Farming systems affect potato (*Solanum tuberosum* L.) tuber and soil quality // Field Crops Research. 2014. Vol. 156. P. 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.10.012>
- Wang Q., Li Y., Wang Y. Optimizing the weight loss-on-ignition methodology to quantify organic and carbonate carbon of sediments from diverse sources // Environmental monitoring and assessment. 2011. Vol. 174. P. 241–257. <https://doi.org/10.1007/s10661-010-1454-z>
- Wang Z., Hassan M.U., Nadeem F., Wu L., Zhang F., Li X. Magnesium fertilization improves crop yield in most production systems: a meta-analysis // Frontiers in Plant Sciences. 2020. Vol. 10. P. 1727. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01727>
- Wszelaki A.L., Delwiche J.F., Walker S.D., Liggett R.E., Scheerens J.C., Kleinhenz M.D. Sensory quality and mineral and glycoalkaloid concentrations in organically and conventionally grown redskin potatoes (*Solanum tuberosum*) // Journal of the Science of Food and Agriculture. 2005. Vol. 85. No. 5. P. 720–726. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2051>
- Xu J., Li Y., Kaur L., Singh J., Zeng F. Functional Food Based on Potato // Foods. 2023. Vol. 12. No. 11. P. 2145. <https://doi.org/10.3390/foods12112145>
- Yakimenko V., Naumova N. Tuning Potassium and Magnesium Fertilization of Potato in the South of West Siberia // Agronomy. 2021. Vol. 11. No. 9. P. 1877. <https://doi.org/10.3390/agronomy11091877>

Поступила в редакцию 22.05.2024

Принята 15.07.2024

Опубликована 15.07.2024

Сведения об авторах:

Наумова Наталья Борисовна – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории агрохимии ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск, Россия); naumova@issa-siberia.ru

Нечаева Таисия Владимировна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории агрохимии ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск, Россия); nechaeva@issa-siberia.ru

Русалимова Ольга Александровна – младший научный сотрудник лаборатории агрохимии ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск, Россия); rusalimova@issa-siberia.ru

Савенков Олег Александрович – кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории агрохимии ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск, Россия); savenkov@issa-siberia.ru

Якименко Владимир Николаевич – доктор биологических наук, заведующий лабораторией агрохимии ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск, Россия); yakimenko@issa-siberia.ru

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.



Статья доступна по лицензии [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Potato tuber yield and quality under potassium and magnesium addition on top of the nitrogen and phosphorus fertilization

© 2024 N.B. Naumova , T.V. Nechaeva , O.A. Rusalimova , O.A. Savenkov , V.N. Yakimenko 

Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Lavrentieva, 8/2, Novosibirsk, Russia. E-mail: naumova@issa-siberia.ru

The aim of the study to investigate the effect of individual or combined K and Mg addition on potato tuber yield and quality along the gradient of soil and environmental conditions, which was formed by the five experimental plots in the forest-steppe one of West Siberia.

Location and time of the study. Microplot field experiment with moderately early potato cultivar Jelly with three fertilization treatments (N100P60, N100P60+K100 and N100P60+K100+Mg100) was setup in five replicates on five experimental plots with agricultural grey soils in the Novosibirsk Region in 2023. Geographical coordinates of the experimental sites varied from 55°15'40" to 54°47'09" NL and from 83°31'42" to 82°37'56" EL.

Methods. Instead of traditional temporal gradient (3–4 years of the experiment at a site) to account for weather variation, with the same purpose we used a spatial gradient, which in addition allowed to assess the effect of soil properties variation among the sites. Soil samples, collected prior to the experiment, were analyzed for organic carbon content, nitrate and ammonium nitrogen, exchangeable phosphorous, potassium and magnesium, as well as soil pH and electrical conductivity. In the course of the experiment air and soil (at 5 and 15 cm depth) temperatures was automatically recorded. At the end of the experiment potato tuber mass and number, as well as the aboveground phytomass, were measured at each microplot. After five months of tuber storage sensory properties (flavour, aroma, colour, mealiness and friability) of boiled tubers were assessed using a Hedonic scale. Analysis of variance, principal components extraction and multiple regression by partial least squares method were performed using Statistica v. 13.1. software.

Results. Addition of K at the background NP fertilization (N100P60+K100 treatment) increased tuber yield by 30% and the aboveground phytomass by 40%. Addition of Mg (N100P60+K100+Mg100) did not affect yield properties, but markedly improved potato culinary quality. More than half of the variance of the potato yield properties was accounted for by the variation in soil and environmental conditions of the experimental fields location. Exchangeable Mg, ammonium N and soil pH were the main soil properties, allowing to forecast the current year tuber yield. The contribution of soil and environmental conditions of the experimental fields into the variance of the sensory properties, albeit small, was statistically significant ($p \leq 0,05$) for aroma and colour, with the similar trend for flavour and friability ($0,05 \leq p \leq 0,10$). Agrochemical properties, i.e. soil organic carbon, readily exchangeable P and nitrate N contents, as well as soil pH, were the main variables, determining tuber quality for consumers.

Conclusions. The study performed on the agricultural grey soil in the forest-steppe zone of West Siberia confirmed the importance of optimizing potato mineral nutrition. Addition of NPK at the balanced rates significantly increased potato yield as compared with NP. Although addition of MG together with NPK did not increase the yield, it markedly improved sensory properties of potato. Some soil properties and temperature conditions, found to determine the yield (effective soil fertility), can be used in prognostic models for potato tuber yields and quality.

Keywords: West Siberia; agricultural grey soil; mineral fertilizers; potato; tuber sensory properties; soil and environmental factors.

How to cite: Naumova N.V., Nechaeva T.V., Rusalimova O.A., Savenkov O.A., Yakimenko V.N. Potato tuber yield and quality under potassium and magnesium addition on top of the nitrogen and phosphorus fertilization. *The Journal of Soils and Environment*. 2024. 7(2). e268. DOI: [10.31251/pos.v7i2.268](https://doi.org/10.31251/pos.v7i2.268). (in Russian with English abstract).

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors are very thankful to Galina Bugrovskaya and Anastasiya Krylova, both Leading Engineers in the Institute of Soil Science and Agrochemistry SB RAS for helping with the field work and carrying out laboratory analyses.

FUNDING

The study was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. 121031700309-1).

REFERENCES

- Averkina S.S., Naumenko I.V. History of the study of agricultural chemistry of phosphorus in soils of Western Siberia. *Innovations and Food Safety*. 2017. No. 2 (16). P. 49–70. (in Russian).
- Agrochemical properties of soils and efficiency of fertilizers / Gamzikov G.P., Ilyin V.B., Nazariuk V.M. et al. Novosibirsk: Nauka Publ., Siberian Branch, 1989. 254 p. (in Russian).
- Aristarkhov A.N. Agrochemical justification for the use of magnesium fertilizers. *Plodorodie*. 2002. No. 2 (5). P. 15–17. (in Russian).
- Artamonov S., Vladimirov V., Mostyakova A. Formation of the harvest and quality of average-early potato tubers of Gala variety, depending on the included doses of potassium fertilizers on the gray forest soil of forest-steppe of the Middle Volga region. *Vestnik of the Kazan State Agrarian University*. 2019. Vol. 14. No. 2 (53). P. 10–14. (in Russian). https://doi.org/10.12737/article_5d3e161e6aba99.12538029
- Verkhovtseva N.V., Lukyanova M.V., Kochetkov I.M., Kubarev E.N. Evaluation of the effect of drugs with physiologically active properties on the antioxidant properties of potato *Solanum tuberosum* L. (using ascorbic acid as an example). *Lomonosov Soil Science Journal*. 2023. Vol. 78. No. 2. P. 56–62. (in Russian). <https://doi.org/10.55959/MSU0137-0944-17-2023-78-2-56-62>
- Voloshin E.I. Influence of potassium fertilizers on potato productivity on chernozem Krasnoyarsk forest steppe. *Bulletin of Krasnoyarsk Agrarian University*. 2006. No. 11. P. 80–85. (in Russian).
- Galeev R.R., Kovalev E.A., Shulga M.S. Yield and quality of potatoes depending on the application of microelements in the northern forest-steppe Ob in Novosibirsk. *Bulletin of Novosibirsk State Agrarian University*. 2021. No. 1 (58). P. 27–35. (in Russian). <https://doi.org/10.31677/2072-6724-2021-58-1-27-35>
- State register of breeding achievements approved for use. Vol. 1. Plant varieties. 2024. URL: <https://gossortrf.ru/registry/gosudarstvennyy-reestr-seleksionnykh-dostizheniy-dopushchennykh-k-ispolzovaniyu-tom-1-sorta-rasteni/dzhelli-kartofel/> (accessed on 12.03.2024). (in Russian).
- Classification and diagnostics of soils of Russian / Authors and compilers: L.L. Shishov, V.D. Tonkonogov, I.I. Lebedeva, M.I. Gerasimov. Smolensk: Oykumena Publ., 2004. 342 p. (in Russian).
- Kirillova G.B., Zhukov Yu.O. Effect of calculated fertilizer rates on potato yield and quality. *Agrokhimia*. 2005. No. 12. P. 31–35. (in Russian).
- Merkusheva M.G., Ubugunov L.L., Garmaev S.R., Boloneva L.N. The Bioproductivity and chemical composition of potato plants on alluvial meadow soil under mineral fertilization in the Transbaikalia. *Agrokhimia*. 2004. No. 10. P. 22–26. (in Russian).
- Methodological guidelines for comprehensive monitoring of soil fertility of agricultural lands. Moscow: "Rosinformagroteh", 2003. 240 p. (in Russian).
- Miller G.F., Solovyev S.V., Bezborodova A.N. Soil-ecological assessment of soils of abandoned lands of diggerent age in the southeast of West Siberia. *The Journal of Soils and Environment*. 2023. Vol. 6. No. 4. e230. (in Russian). <https://doi.org/10.31251/pos.v6i4.230>
- Workshop on agrochemistry. 2nd edition, revised and supplemented / V.G. Mineev (ed.). Moscow: Lomonosov Moscow State University, 2001. 689 p. (in Russian).
- Scriabin I.A. Magnesium content in potato leaves and tubers depending on foliar fertilization with magnesium sulfate fertilizer in the conditions of the Middle Urals. *Dnevnik Nauki*. 2023. No. 12 (84). (in Russian).
- Talashova A.V. Qualitative characteristics of medium-early potato yield at complex application of fertilizers and irrigation. *Vestnik of the Belarusian State Agricultural Academy*. 2019. No. 4. P. 143–147. (in Russian).
- Titlyanova A.A., Mironycheva-tokareva N.P., Naumova N.B. Carbon cycle in the developing grass ecosystems of earth excavation. *Pochvovedenie*. 1988. No. 7. P. 164–174. (in Russian).

Tikhomirova V.Ya. Effect of soil environment, mineral fertilizers, potassium, weather conditions on the magnesium supply of agricultural crops. *Agrokhimia*. 2011. No. 5. P. 84–89. (in Russian).

Ubugunov L.L., Merkusheva M.G. Fertilization of potatoes. Novosibirsk: Nauka Publ., Siberian Branch, 2019. 264 p. (in Russian). <https://doi.org/10.7868/978-5-02-038799-7>

Agroanalytics Center. Russia has harvested the highest potato crop in 30 years. Publication date 09.01.2024. [Electronic resource]. URL: <https://specagro.ru/news/202401/v-rossii-sobrali-samyi-vysokiy-urozhay-kartofelya-za-30-let> (accessed on 13.04.2024).

Shpaar D., Bykin A., Dreger D. Potatoes. Minsk: "Orekh", 2004. 465 p. (in Russian).

Yakimenko V.N. Potassium in agrocenoses of Western Siberia. Novosibirsk: Published by Siberian Branch of RAS, 2003. 231 p. (in Russian).

Yakimenko V.N. Efficiency of potassium nutrition level of potatoes. *Plodorodie*. 2005. No. 5 (26). P. 11–13. (in Russian).

Yakimenko V.N. Effect of potassium nutrition on the yield and quality of potatoes. *Plodorodie*. 2017. No. 4 (97). P. 6–10. (in Russian).

Yakimenko V.N. Interaction of potassium and magnesium in cultivation of potatoes on gray forest soil. *Agrokhimia*. 2021. No. 6. P. 8–15. (in Russian). <https://doi.org/10.31857/S0002188121050136>

Assunção N.S., Ribeiro N.P., da Silva R.M., Soratto R.P., Fernandes A.M. Tuber yield and allocation of nutrients and carbohydrates in potato plants as affected by limestone type and magnesium supply. *Journal of Plant Nutrition*. 2020. Vol. 43. No. 1. P. 51–63. <https://doi.org/10.1080/01904167.2019.1659345>

Bak G.R., Lee K.K., Clark I.M., Mauchline T.H., Kavamura V.N., Lund G., Jee S., Lee J.T., Kim H., Lee Y.H. The potato rhizosphere microbiota correlated to the yield of three different regions in Korea. *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14. No. 1. P. 4536. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-55263-7>

Bechhoff A., Adinsi L., Ngoh Newilah G., Nakitto M., Deucher Z., Ssali R., Chijioke U., Khakasa E., Nowakunda K., Bouniol A., Dufour D., Bugaud C. Combined use of sensory methods for the selection of root, tuber and banana varieties acceptable to end-users. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2023. <https://doi.org/10.1002/jsfa.12723>

Beringer H., Haeder H.E., Lindhauer M. Water relationships and incorporation of C assimilates in tubers of potato plants differing in potassium nutrition. *Plant Physiology*. 1983. Vol. 73. No. 4. P. 956–960. <https://doi.org/10.1104/pp.73.4.956>

Bražinskienė V., Asakaviciute R., Miezelienė A., Alencikiene G., Ivanauskas L., Jakstas V., Viskelis P., Razukas A. Effect of farming systems on the yield, quality parameters and sensory properties of conventionally and organically grown potato (*Solanum tuberosum* L.) tubers. *Food Chemistry*. 2014. Vol. 145. P. 903–909. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.09.011>

Chang D.C., Jin Y.K., Nam J.H., Cheon C.G., Cho, J.H., Kim S.J. Early drought effect on canopy development under growth of potato cultivars with different maturities. *Field Crops Research*. 2018. Vol. 215. P. 156–162. <https://doi.org/doi/10.1016/j.fcr.2017.10.008>

Dechassa N., Schenk M.K., Claassen N., Steingrobe B. Phosphorus efficiency of cabbage (*Brassica oleraceae* L. var. capitata), Carrot (*Daucus carota* L.), and Potato (*Solanum tuberosum* L.). *Plant and Soil*. 2003. Vol. 250. P. 215–224. <https://doi.org/10.1023/A:1022804112388>

Drapal M., De Boeck B., Kreuze H.L., Bonierbale M., Fraser P.D. Identification of metabolites associated with boiled potato sensory attributes in freshly harvested and stored potatoes. *Journal of Food Composition and Analysis*. 2022. Vol. 115. P. 104934. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2022.104934>

FAOSTAT. Data. Crops and livestock products, potatoes. Food and Agriculture organization of the United Nations, 2024. [Electronic resource]. URL: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL> (accessed on 13.04.2024).

Food and Agriculture Organization of the United Nation. International Day of Potato. 30 May 2023. [Electronic resource]. URL: <https://www.fao.org/international-potato-day/en> (accessed on 06.05.2024).

Hlišnikovský L., Menšík L., Kunzová E. The Effect of Soil-Climate Conditions, Farmyard Manure and Mineral Fertilizers on Potato Yield and Soil Chemical Parameters. *Plants*. 2021. Vol. 16. No. 10 (11). P. 2473. <https://doi.org/10.3390/plants10112473>

Hajslova J., Schulzova V., Slanina P., Janne K., Hellenas K. E., Andersson C. Quality of organically and conventionally grown potatoes: Four-year study of micronutrients, metals, secondary metabolites, enzymic browning and organoleptic properties. *Food Additives and Contaminants*. 2005. Vol. 22. No. 6. P. 514–534. <https://doi.org/16019825>

- Hopkins B.G., Horneck D.A., MacGuidwin A.E. Improving phosphorus use efficiency through potato rhizosphere modification and extension. *American Journal of Potato Research*. 2014. Vol. 91. P.161–174. <https://doi.org/10.1007/s12230-014-9370-3>
- Hopkins B.G., Hansen N.C. Phosphorus Management in High-Yield Systems. *Journal of environmental quality*. 2019. Vol. 48. P. 1265–1280. <https://doi.org/10.2134/jeq2019.03.0130>
- Ishfaq M., Zhong Y., Wang Y., Li X. Magnesium Limitation Leads to Transcriptional Down-Tuning of Auxin Synthesis, Transport, and Signaling in the Tomato Root. *Frontiers in Plant Science*. 2021. Vol. 23. No. 12. P. 802399. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.802399>
- Ierna A., Melilli M.G., Parisi B. Sensory characteristics of raw and cooked “early” potato tubers as affected by organic cultivation. *Acta Hort.* 2022. No. 1354. P. 375–382. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2022.1354.49>
- Kirchgesser J., Hazarika M., Bachmann-Pfabe S., Dehmer K.J., Kavka M., Uptmoor R. Phenotypic variation of root-system architecture under high P and low P conditions in potato (*Solanum tuberosum* L.). *BMC Plant Biology*. 2023. Vol. 23. No. 1. P. 68. <https://doi.org/10.1186/s12870-023-04070>
- Knoblauch H.C., Ödland T.E. A magnesium deficiency induced by previous fertilizer treatments. *Journal of the American Society of Agronomy*. 1934. Vol. 26. No. 7. P. 609–615. <https://doi.org/10.2134/agronj1934.00021962002600070010x>
- Koch L., Lehretz G.G., Sonnewald U., Sonnewald S. Yield reduction caused by elevated temperatures and high nitrogen fertilization is mitigated by SP6A overexpression in potato (*Solanum tuberosum* L.). *Plant Journal*. 2024. Vol. 117. No. 6. P. 1702–1715. <https://doi.org/10.1111/tpj.16679>
- Koch M., Busse M., Naumann M., Jákli B., Smit I., Cakmak I., Hermans C., Pawelzik E. Differential effects of varied potassium and magnesium nutrition on production and partitioning of photoassimilates in potato plants. *Physiologia plantarum*. 2019. Vol. 166. No. 4. P. 921–935. <https://doi.org/10.1111/ppl.12846>
- Koch M., Naumann M., Pawelzik E., Gransee A., Thiel H. The Importance of Nutrient Management for Potato Production Part I: Plant Nutrition and Yield. *Potato Research*. 2020a. Vol. 63. P. 97–119. <https://doi.org/10.1007/s11540-019-09431-2>
- Koch M., Winkelmann M. K., Hasler M., Pawelzik E., Naumann M. Root growth in light of changing magnesium distribution and transport between source and sink tissues in potato (*Solanum tuberosum* L.). *Scientific Reports*. 2020b. Vol. 10. No. 1. P. 8796. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-65896-z>
- Kreutzmann S., Bassompierre M., Thybo A.K., Buch L., Engelsen S.B. Exploratory Study of Potato Cultivar Differences in Sensory and Hedonistic Applicability Tests. *Potato Research*. 2011. Vol. 54. No. 1. P. 13–28. <https://doi.org/10.1007/s11540-010-9168-8>
- Li K., Li M., Zhou J., Guo H. The Impact of the Individual and Combined Application of Phosphorus and Sulfur Fertilizers on Potato Tuber Flavor. *Foods*. 2023. Vol. 12. No. 20. P. 3764. <https://doi.org/10.3390/foods12203764>
- Márton L. Fertilisation, rainfall and crop yield. *Acta Agronomica Academiae Scientiarum Hungaricae*. 2004. Vol. 52. No. 2. P. 165–172. <https://doi.org/10.1556/AAgr.52.2004.2.7>
- Nantongo J.S., Tinyiro S.E., Nakitto M., Serunkuma E., Namugga P., Ayetigbo O., Mayanja S., Moyo M., Ssali R., Mendes T. End-user preferences to enhance prospects for varietal acceptance and adoption in potato breeding in Uganda. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2023. <https://doi.org/10.1002/jsfa.12882>
- Nielsen K.F., Halstead R.L., MacLean A.J., Bourget S. J., Holmes, R.M. The Influence of Soil Temperature on the Growth and Mineral Composition of Corn, Bromegrass and Potatoes. *Soil Science Society of America Journal*. 1961. Vol. 25. No. 5. P. 369–372. <https://doi.org/10.2136/sssaj1961.03615995002500050019x>
- Oowski J., Erlichowski T., Urbanowicz J. Wpływ nawożenia potasem, magnezem i siarką na plonowanie, ciemnienie bulw surowych oraz występowanie alternariozy i ospowatości bulw ziemniaka [The effect of potassium, magnesium and sulphur fertilization on the yield, raw tuber darkening and occurrence of black scurf and early blight of potato tubers]. *Fragm. Agron.* 2017. Vol. 34. No. 1. P. 49–59. URL: [https://pta.up.poznan.pl/pdf/2017/FA%2034\(1\)%202017%20Oowski.pdf](https://pta.up.poznan.pl/pdf/2017/FA%2034(1)%202017%20Oowski.pdf) (accessed on 17.04.2024). (in Polish).
- Retmańska K., Pobereźny J., Wszelaczyńska E., Gościnną K., Ropińska P. Organoleptic characteristics and the total glycoalkaloid content of edible potato tubers depending on a cultivation technology and storage. *Journal of Elementology*. 2023. Vol. 28. No. 1. P. 7–25. <https://doi.org/10.5601/jelem.2022.27.4.2359>
- Singh B., Goutam U., Kukreja S., Sharma J., Sood S., Bhardwaj V. Potato biofortification: an effective way to fight global hidden hunger. *Physiology and Molecular Biology of Plants*. 2021. Vol. 27. No. 10. P. 2297–2313. <https://doi.org/10.1007/s12298-021-01081-4>
- Tein B., Kauer K., Ereemeev V., Luik A., Selge A., Loit E. Farming systems affect potato (*Solanum tuberosum* L.) tuber and soil quality. *Field Crops Research*. 2014. Vol. 156. P. 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.10.012>

Wang Q., Li Y., Wang Y. Optimizing the weight loss-on-ignition methodology to quantify organic and carbonate carbon of sediments from diverse sources. *Environmental monitoring and assessment*. 2011. Vol. 174. P. 241–257. <https://doi.org/10.1007/s10661-010-1454-z>

Wang Z., Hassan M.U., Nadeem F., Wu L., Zhang F., Li X. Magnesium fertilization improves crop yield in most production systems: a meta-analysis. *Frontiers in Plant Sciences*. 2020. Vol. 10. P. 1727. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01727>

Wszelaki A.L., Delwiche J.F., Walker S.D., Liggett R.E., Scheerens J.C., Kleinhenz M.D. Sensory quality and mineral and glycoalkaloid concentrations in organically and conventionally grown redskin potatoes (*Solanum tuberosum*). *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2005. Vol. 85. No. 5. P. 720–726. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2051>

Xu J., Li Y., Kaur L., Singh J., Zeng F. Functional Food Based on Potato. *Foods*. 2023. Vol. 12. No. 11. P. 2145. <https://doi.org/10.3390/foods12112145>

Yakimenko V., Naumova N. Tuning Potassium and Magnesium Fertilization of Potato in the South of West Siberia. *Agronomy*. 2021. Vol. 11. No. 9. P. 1877. <https://doi.org/10.3390/agronomy11091877>

Received 22 May 2024

Accepted 15 July 2024

Published 15 July 2024

About the authors:

Natalia B. Naumova – Candidate of Biological Sciences, Leading Researcher in the Laboratory of Agrochemistry in the Institute of Soil Science and Agrochemistry, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); naumova@issa-siberia.ru

Taisia V. Nechaeva – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher in the Laboratory of Agrochemistry in the Institute of Soil Science and Agrochemistry, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); nechaeva@issa-siberia.ru

Olga A. Rusalimova – Junior Researcher in the Laboratory of Agrochemistry in the Institute of Soil Science and Agrochemistry, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); rusalimova@issa-siberia.ru

Oleg A. Savenkov – Candidate of Biological Sciences, Researcher in the Laboratory of Agrochemistry in the Institute of Soil Science and Agrochemistry, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); savenkov@issa-siberia.ru

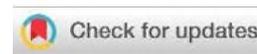
Vladimir N. Yakimenko – Doctor of Biological Sciences, Head of the Laboratory of Agrochemistry in the Institute of Soil Science and Agrochemistry, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); yakimenko@issa-siberia.ru

The authors read and approved the final manuscript



The article is available under [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

УДК 631.4

<https://doi.org/10.31251/pos.v7i2.252>

Применение ансамбля T&P-моделей для оценки дыхания лесных почв в зоне умеренно-континентального климата

© 2024 С. Н. Кивалов , И. Н. Курганова , В. О. Лопес де Гереню , Т. Н. Мякшина , Д. В. Сапронов , Д. А. Хорошаев 

Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН – обособленное подразделение ФГБУН «Федеральный исследовательский центр «Пушкинский научный центр биологических исследований РАН», ул. Институтская, д. 2, корпус 2, г. Пушкино, Московская обл., 142290, Россия.

E-mail: snk2105@gmail.com

Цель исследования. Используя ансамбль T&P-моделей (эмпирических моделей дыхания почвы, связывающих его с температурой, осадками и другими метео- и почвенными параметрами, показать зависимость выбора оптимальных эмпирических моделей дыхания почвы от типов почв лесных экосистем – дернового подбур и серой лесной, а также от вариантов параметризации моделей с помощью температур почвы или воздуха, осадков и запаса органического углерода в почве.

Место и время проведения. Зона умеренно-континентального климата Средней полосы России: хвойно-широколиственный лес северного берега р. Оки и широколиственный лес южного берега р. Оки; сбор и обработка данных за 1998–2022 годы.

Методы. Использовали ансамбль эмпирических моделей дыхания почвы, связывающий дыхание почвы с месячными средними температур почв или воздуха и осадков, а также запасами органического углерода в почве. При этом предложен метод определения дыхания почвы при нуле градусов по результатам сравнительного анализа моделируемых данных с измерениями.

Основные результаты. Для дернового подбур – почвы с хорошим дренажем – лучшими показали себя модели, связывающие дыхание почвы с ее температурой, осадками и запасом органического углерода, в то время как для серой лесной – почвы с хорошей водоудерживающей способностью – лучшей моделью оказалась модель типа Райха-Хаитмото с квадратичной зависимостью от температуры в экспоненте.

Заключение. При выборе оптимальных эмпирических моделей дыхания почвы продемонстрирована важность учета таких почвенных параметров как запас органического углерода и способность удерживать влагу.

Ключевые слова: моделирование дыхания почв; дерновый подбур (*Entic Podzol*); серая лесная почва (*Haplic Luvisol*); лесные экосистемы; ансамбль эмпирических моделей.

Цитирование: Кивалов С.Н., Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Мякшина Т.Н., Сапронов Д.В., Хорошаев Д.А. Применение ансамбля T&P-моделей для оценки дыхания лесных почв в зоне умеренно-континентального климата // Почвы и окружающая среда. 2024. Том 7. № 2. e252. DOI: [10.31251/pos.v7i2.252](https://doi.org/10.31251/pos.v7i2.252).

ВВЕДЕНИЕ

Почвенное дыхание (SR – soil respiration) – это основной путь, по которому углерод покидает наземные экосистемы (Ryan, Law, 2005; Peltoniemi et al., 2007; Le Quéré et al., 2015), изменяя запасы органического углерода (SOC – soil organic carbon) почвы и его распределение в ней (Valentini et al., 2000). Именно поэтому мониторинг почвенного дыхания нужно проводить для оценки способности экосистемы противостоять стрессам, вызванным неблагоприятными изменениями окружающей среды и климата (Peltoniemi et al., 2007; Le Quéré et al., 2015), и представления ежегодной инвентаризации парниковых газов (UNFCCC 2006).

Ряд исследований, посвященных как измерениям почвенного дыхания, так и применению эмпирических моделей, подчеркивает зависимость дыхания почвы от: (1) температуры (Howard P., Howard D., 1979; O'Connell, 1990; Raich, Potter, 1995; Lopes De Gerenyu et al., 2005; Juhász et al., 2022); (2) влажности (Orchard, Cook, 1983; Raich, Potter, 1995; Jarvis et al., 2007; Maier et al., 2010; Chamindu Deeragoda et al., 2015); (3) осадков как замещения влажности (Выгодская и др., 2009; Карелин и др., 2017; Суховеева, Карелин, 2022; Raich, Potter, 1995; Yuste et al., 2003; Kurganova et al., 2017; 2020); (4) изменения уровня воды в почве (Махныкина и др., 2021; Kayranli et al., 2010; Pavelka et al., 2016); (5) распределения надземной биомассы (Reichstein et al., 2003; Macdonald et al., 2021) и запасов

органического углерода, хранящихся в почвах экосистем (Ильясов и др., 2020; Del Grosso et al., 2005; Lal, 2005; Ryan, Law, 2005; Chen et al., 2010; Soil carbon ..., 2018; Kivalov et al., 2023).

Ансамбли эмпирических моделей позволяют провести непосредственное сравнение этих моделей при сохранении общей параметризации, чтобы исследовать их применимость в различных условиях и к различным экосистемам (Dyukarev, Kurakov, 2023; Kivalov et al., 2023).

Исходя из непосредственной зависимости активности микробной биомассы от температуры почвы (Raich, Potter, 1995; Monson et al., 2006), использование температуры почвы (T_{soil}) может значительно улучшить результаты моделирования дыхания почвы по сравнению с использованием температур воздуха (T_{air}). С другой стороны, пористость почвы влияет на доступность атмосферного кислорода в ней, что вместе с различным количеством запасов органического углерода может влиять на величину дыхания для разных почв (Марчик, Ефремов, 2006; Maier et al., 2010; Neira et al., 2015).

Настоящее исследование направлено на рассмотрение этих гипотез путем выявления лучших версий эмпирических моделей дыхания почвы в ансамблях моделей, параметризованных среднемесячными значениями (1) температуры почвы или воздуха (T), (2) количества осадков (P) и (3) запасов органического углерода (C) в применении к песчаному дерновому подбурю и суглинистой серой лесной почве лесных экосистем в зоне умеренно-континентального климата.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Данные измерения дыхания почвы получены с двух площадок в зоне умеренно-континентального климата (табл. 1). Первая площадка с дерновым подбуром ($54^{\circ}50'$ с.ш., $37^{\circ}35'$ в.д.) расположена в зоне хвойно-широколиственных лесов в Приокско-Террасном природном биосферном заповеднике на северном берегу р. Оки; ландшафт представляет собой песчаные террасы, расположенные над поймой. Вторая площадка с серой лесной почвой ($54^{\circ}20'$ с.ш., $37^{\circ}37'$ в.д.) расположена в зоне широколиственных лесов на южном берегу р. Оки; ландшафт холмистый, возвышается на 100–150 м над рекой. Река Ока служит границей между лесными зонами. Расстояние между участками составляет около 8,6 км в направлении север-юг. Подробное описание участков измерений приведено в работе С.Н. Кивалова с соавторами (Kivalov et al., 2023). Обе площадки находятся в одной климатической зоне со среднегодовой температурой воздуха $4,8^{\circ}\text{C}$, летом $+17,6^{\circ}\text{C}$ (макс. $38-39^{\circ}\text{C}$), зимой $-8,3^{\circ}\text{C}$ (мин. -43°C в 1978); среднее количество осадков – 671 мм (максимум 91 мм в июле) (<https://pt-zapovednik.org>, комплексная измерительная станция рядом с посёлком Данки).

Таблица 1

Свойства леса и свойств почвы на площадках измерений (данные для дернового подбура обновлены по результатам измерительной компании 2023 года)

		Дерновый подбур*	Серая лесная*
Лес	Лесная зона	Хвойно-широколиственная	Широколиственная
	Тип леса	Зрелый хвойно-широколиственный лес: сосна, липа, осина, береза и дуб; средним возрастом до 90-120 лет ¹⁾	Вторичный широколиственный лес: осина, липа, береза и клен; средним возрастом до 50-70 лет ¹⁾
Почва (0–20 см)	Текстура	песочно-суглинистая ¹⁾	суглинистая ¹⁾
	Гранулометрия (песок: ил: глина)	85 : 13 : 2	40 : 40 : 20 ²⁾
	pHКCl	4,55	5,56 ¹⁾
	C/N [kg(C) kg(N) ⁻¹]	14,4	12,8 ¹⁾
	Запасы органического углерода (кг C/м ²)	2,91	5,02 ³⁾
Водоудерживающая способность (%)	40,5 ¹⁾	57,5 ¹⁾	

Примечание.

* – название почв приведено согласно: Классификация и диагностика почв СССР (1977). Дерновый подбур по классификации IUSS Working Group WRB (2014) соответствует Entic Podzol, серая лесная почва – Naplic Luvisol. ¹⁾ Kurganova et al. (2017); ²⁾ Brown (2007); ³⁾ Kurganova et al. (2022).

Следует отметить, что исследуемые почвы существенно отличаются как по гранулометрическому составу – значительное содержание илистой и глинистой фракций в серой

лесной почве, так и по их способности удерживать влагу – слабая у дернового подбуря и достаточно хорошая у серой лесной почвы, что оказывает непосредственное влияние на водный баланс экосистем.

В исследовании использованы 25-летние измерения дыхания почвы, проводимые на этих площадках с помощью закрытых камер (Kurganova et al., 2020). Одновременно с дыханием почвы измеряются температура почвы на глубине 5 см (T_{soil}) и температура воздуха на высоте 1 м. Месячные средние температур воздуха (T_{air}) и количества осадков (P) взяты из архива комплексной измерительной станции, расположенной около поселка Данки.

Рассматриваются следующие эмпирические модели дыхания почвы, связывающие SR с T (Kurganova et al., 2020):

$$SR_T = R_0 e^{QT} \quad (1)$$

связывающие SR с T и P (Суховеева, Карелин, 2022; Raich, Potter, 1995; Lopes De Gerenu et al., 2005):

$$SR_{TP} = R_0 e^{QT} \left(\frac{P}{K+P} \right) \quad (2)$$

$$SR_{TPP} = R_0 e^{QT} \left(\frac{\alpha P + (1-\alpha)P_{m-1}}{K + \alpha P + (1-\alpha)P_{m-1}} \right) \quad (3)$$

$$SR_{TPPrh} = R_0 e^{(QT-Q_2T^2)} \left(\frac{\alpha P + (1-\alpha)P_{m-1}}{K + \alpha P + (1-\alpha)P_{m-1}} \right) \quad (4)$$

связывающие SR с T , P и SOC (Kivalov et al., 2023):

$$SR_{TPPC} = R_0 e^{QT} \left(\frac{\alpha P + (1-\alpha)P_{m-1}}{K + \alpha P + (1-\alpha)P_{m-1}} \right) \left(\frac{SOC}{\psi + SOC} \right) \quad (5)$$

где R_0 – дыхание почвы при $T_{soil} = 0^\circ C$ и отсутствии оледенения поверхностного слоя почвы, препятствующего газообмену (нормальные условия). После определения R_0 , остальные параметры моделей последовательно вычисляются с помощью нелинейной регрессии (nlm): Q и Q_2 – температурные коэффициенты; K – константа полунасыщения между SR и P ; α – коэффициент перераспределения осадков между текущим (P) и предыдущим (P_{m-1}) месяцами; ψ – константа полунасыщения между SR и SOC .

Параметры температурной модели дыхания почвы T (выражение 1) являются ключевыми во всех приведённых моделях (выражения 1–5). Параметр R_0 непосредственно связан с измеренным дыханием почвы и определяет точку отсчета моделей при дальнейшем изменении их параметров. Поэтому он не является свободным параметром модели, его необходимо определять и фиксировать перед (при) применением регрессионного анализа. Параметр Q определяет наиболее существенную зависимость изменения дыхания почвы, связанную с изменением T_{soil} или T_{air} .

Для определения R_0 мы используем линейную модель сравнения между измеренными и смоделированными данными, где R_0 соответствует данным, измеренным в холодный период (синяя выделенная зона, рис. 1). Как правило, из-за недостатков нелинейной регрессии, основанной на минимизации среднеквадратичного отклонения, происходит переоценка нижних значений, в результате которой коэффициент пересечения с осью ординат оказывается положительным, что приводит к некорректному размещению R_0 (рис. 1).

Предлагаемый нами подход оптимизации (рис. 1) – последовательно проводить нелинейную регрессию на моделях (выражения 1–5) с фиксацией общих параметров R_0 и Q и контролем над параметром R_0 , чтобы привести коэффициент пересечения с осью ординат линейной модели к нулевому значению. Таким образом, удаётся корректно разместить R_0 , а также выделить влияние других описанных выше параметров приведённых моделей и определить какие из них будут работать лучше в конкретных условиях.

Качество моделей оценивается по величине наклона линейной модели сравнения (slope), коэффициенту детерминации (R^2), а также по среднеквадратичному отклонению смоделированных и измеренных данных (RMSE – root mean square error).

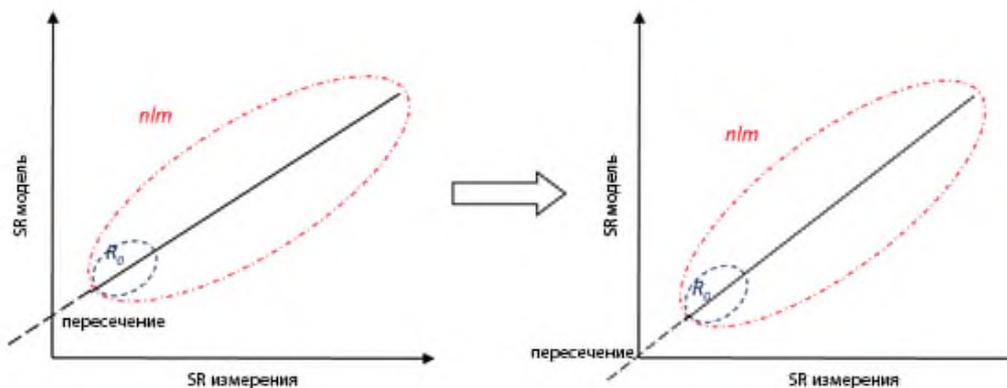


Рисунок 1. Иллюстрация метода определения почвенного дыхания при 0°C и нормальных условиях (R_0) исходя из оптимизации по пересечению с осью ординат линейной модели сравнения между измеренными и смоделированными данными.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Стандартный подход к оценке R_0 предусматривает определение дыхания почвы, измеренного в промежутке температур между 0 и +1 °C, с последующим усреднением. При этом возникает проблема возможной переоценки R_0 из-за экспоненциальной температурной зависимости SR (выражение 1) и несимметричного по температуре выбора значений SR: R_0 должно соответствовать $T_{soil} = 0$ °C, что не выдерживается при стандартном выборе SR: $0 < T_{soil} < +1$ °C. Результат предложенной нами оптимизации параметра R_0 (рис. 2.) показывает, что этой переоценки удастся избежать и оцененная R_0 оказывается в пределах нижней четверти от измеренных при $0 < T_{soil} < +1$ °C значений дыхания почвы.

Большой разброс в измеренных значениях дыхания почвы ассоциируется с различным режимом осадков в разные годы. Для дернового подбур наименьшие значения SR были измерены при недостатке осадков, тогда как для серой лесной почвы недостаток осадков ассоциируется с наибольшим измеренным SR. Эта аномалия может быть объяснена из различия способности почв удерживать влагу – дерновый подбур легко пересыхает, в то время как серая лесная почва легко переувлажняется, что может непосредственно влиять на активность микробной биомассы.

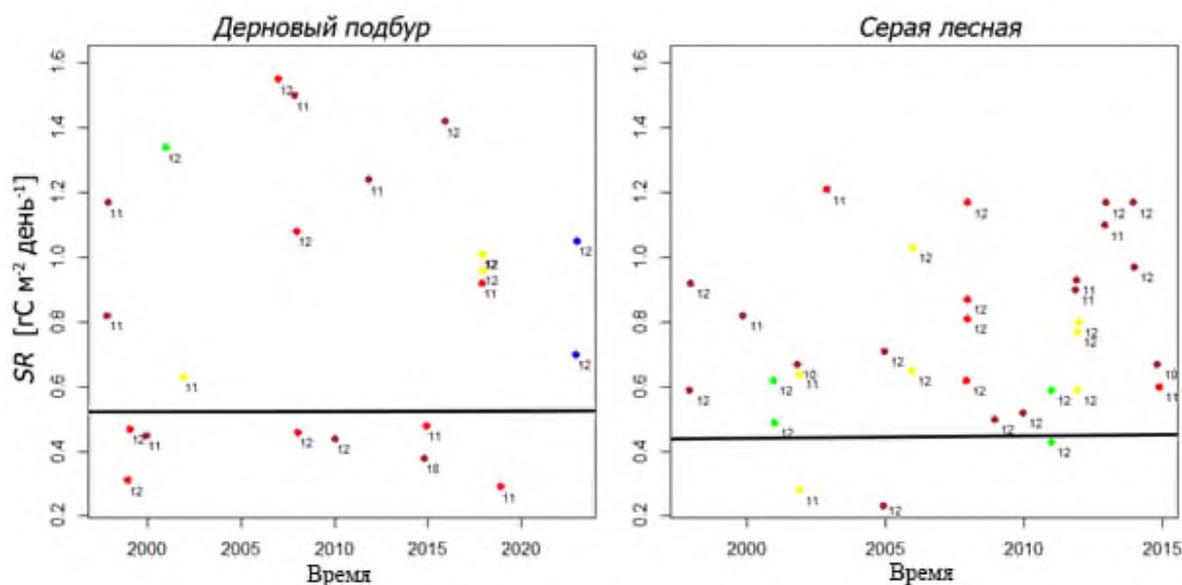


Рисунок 2. Результаты выбора R_0 (черные линии) по проведённой оптимизации линейного сравнения между измеренными и смоделированными значениями почвенного дыхания. Точки – измерения почвенного дыхания, отмеченные соответствующими месяцами; цветовая схема точек – наличие среднемесячных осадков: красный ($11 < P < 34$ мм), коричневый ($34 < P < 57$ мм), жёлтый ($57 < P < 80$ мм), зелёный ($80 < P < 103$ мм) и голубой ($103 < P < 126$ мм).

Сравнение между использованными в ансамбле моделями (выражения 1–5) показывает (рис. 3.), что для песчаного дернового подбур с хорошим дренажем и низким содержанием органического углерода подходят модели, учитывающие запасы органического углерода (TPPC) и типа Райха-Хашимото с квадратичной температурной зависимостью (TPPrh), в то время как для суглинистой серой лесной почвы, имеющей хорошую водоудерживающую способность, лучше применять модели типа Райха-Хашимото с квадратичной температурной зависимостью (TPPrh), которая может быть связана с реакцией микробной биомассы на изменения температуры в летнее время. Результаты моделирования этими моделями показывают наиболее близкие к измеренным средние значения (синие стойки, рис. 3.) и оказываются в пределах границ неопределенности, определяемых стандартными отклонениями (вертикальные планки, рис. 3.).

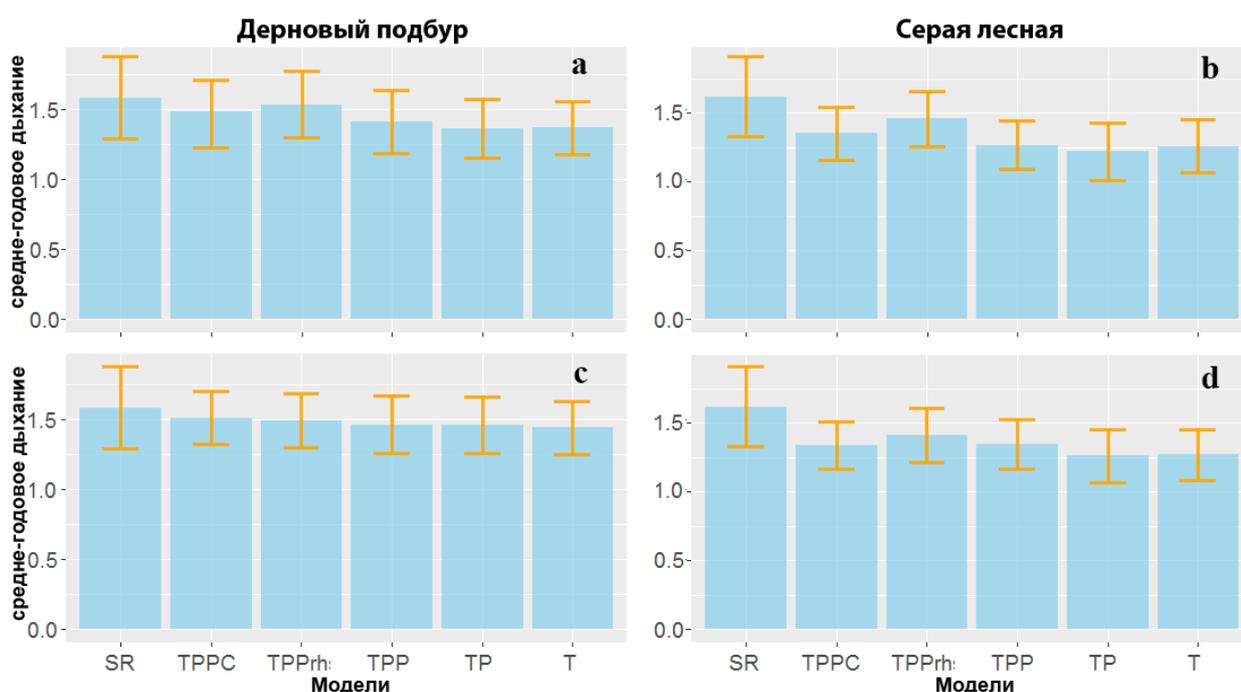


Рисунок 3. Средние в течение года дневные значения 25-летних измерений почвенного дыхания (SR, г С м⁻² день⁻¹) и моделирования (голубой цвет, модели – TPPrh, TPPC, TPP, TP, T). Вертикальные планки – стандартное отклонение годовых значений SR. (a, b) – Tsoil (локальные данные), (c, d) – Tair (измерительная станция Данки).

Таблица 2

Результаты сравнения по slope, R² и RMSE моделей дыхания почвы (T, TP, TPP, TPPC, TPPrh) с измерениями при параметризации моделей температурой почвы (s) или воздуха (a)

model	Дерновый подбур			Серая лесная		
	R ²	slope	RMSE	R ²	slope	RMSE
Ts	0,63	0,74	0,65	0,53	0,71	0,83
TPs	0,65	0,73	0,65	0,53	0,71	0,83
TPPs	0,65	0,73	0,64	0,53	0,72	0,81
TPPCs	0,70	0,87	0,59	0,58	0,84	0,78
TPPrhs	0,71	0,84	0,55	0,61	0,76	0,68
Ta	0,60	0,71	0,64	0,51	0,67	0,81
TPa	0,62	0,70	0,64	0,51	0,67	0,81
TPPa	0,62	0,70	0,64	0,50	0,68	0,81
TPPCa	0,70	0,88	0,59	0,60	0,85	0,75
TPPrha	0,66	0,83	0,61	0,58	0,75	0,73

Примечание.

Жирным выделены цифры, обозначающие наибольшие R² и slope и наименьшие RMSE.

Эти же модели оказываются лучшими из рассмотренных моделей по величине наклона линейной модели сравнения (slope), коэффициенту детерминации (R^2), а также по среднеквадратичному отклонению моделированных и измеренных данных (RMSE) (табл. 2). Для обеих почв, при параметризации температурой почвы, TRPrh показывает несколько лучшие результаты по R^2 и RMSE, при этом отставая от TRPC по значению slope. При параметризации температурой воздуха, TRPC показывает несколько лучшие результаты по всем параметрам для дернового подбуря и лучше, чем TRPrh по slope, R^2 для серой лесной почвы. Однако, несмотря на хорошие результаты моделирования для серой лесной почвы, TRPC оказывается вне зоны неопределенности по сравнению с измеренными данными (рис. 3d), из-за чего не должна быть использована в текущей параметризации.

ВЫВОДЫ

1. Продемонстрированы важность учёта запасов органического углерода и водоудерживающей способности почв для выбора правильных моделей дыхания почвы.
2. Для песчаного дернового подбуря лучше использовать модели с зависимостью от запасов органического углерода и модели типа Райха-Хашимото.
3. Для суглинистой серой лесной лучше применять модели типа Райха-Хашимото.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённое исследование демонстрирует важность учёта запасов органического углерода и водоудерживающей способности почв для выбора лучших версий эмпирических моделей дыхания почвы. Для песчаного дернового подбуря с грубой структурой и хорошим дренажем лучше использовать модели, учитывающие запасы органического углерода (TRPC) и модели типа Райха-Хашимото (TRPrh), в то время как для суглинистой серой лесной, имеющего более тонкую структуру и хорошую водоудерживающую способность, лучше применять модели типа Райха-Хашимото (TRPrh) с квадратичной температурной зависимостью, которая может быть связана реакцией микробной биомассы на изменения температуры в летнее время.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Сбор и подготовка данных осуществлялись в рамках и при поддержке важнейшего инновационного проекта государственного значения «Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, обеспечивающей создание систем учета данных о потоках климатически активных веществ и углеродном балансе в лесах и других наземных экологических системах» (регистрационный № 123030300031-6); работы по анализу и моделированию данных выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № 122111000095-8).

ЛИТЕРАТУРА

- Ильясов Д.В., Молчанов А.Г., Глаголев М.В., Суворов Г.Г., Сирин А.А. Моделирование нетто-экосистемного обмена диоксида углерода сенокоса на осушенной торфяной почве: анализ сценариев использования // Компьютерные исследования и моделирование. 2020. Том 12. № 6. С. 1427–1449. <https://doi.org/10.20537/2076-7633-2020-12-6-1427-1449>
- Карелин Д.В., Замолотчиков Д.Г., Исаев А.С. Малоизвестные импульсные составляющие почвенной эмиссии диоксида углерода в таёжных лесах // Доклады академии наук. 2017. Том 475. № 4. <https://doi.org/10.7868/S0869565217220248>
- Классификация и диагностика почв СССР / Составители: В.В. Егоров, В.М. Фридланд, Е.Н. Иванова, Н.Н. Розова, В.А. Носин, Т.А. Фриев. Москва: Колос, 1977. 224 с.
- Марчик Т.П., Ефремов А.Л. Почвоведение с основами растениеводства: учеб. пособие. Гродно: ГрГУ, 2006. 249 с. https://ebooks.grsu.by/pochva_s_osn_rast/index.htm
- Махныкина А.В., Полосухина Д.А., Колосов Р.А., Прокушкин А.С. Сезонная динамика эмиссии CO_2 с поверхности верхового болота Центральной Сибири // Геосферные исследования. 2021. № 4. С. 85–93. <https://doi.org/10.17223/25421379/21/7>
- Суховеева О.Э., Карелин Д.В. Оценка дыхания почв с помощью модели Райха–Хашимото: параметризация и прогноз // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2022. Том 86. № 4. С. 519–527. <https://doi.org/10.31857/S2587556622030153>

- Выгодская Н.Н., Варлагин А.В., Курбатова Ю.А., Ольчев А.В., Панферов О.И., Татарин Ф.А., Шалухина Н.В. Реакция таежных экосистем на экстремальные погодные условия климатические аномалии // Доклады академии наук. 2009. Том 429. № 6. С. 842–845.
- Brown R.B. Soil Texture. Agronomy Fact Sheet Series SL-29. Department of Crop and Soil Sciences. Cornell University, 2007. <http://nmsp.cals.cornell.edu/publications/factsheets/factsheet29.pdf>
- Chamindu Deepagoda T.K.K., Elberling B. Characterization of diffusivity-based oxygen transport in Arctic organic soil // European Journal of Soil Science. 2015. Vol. 66. Iss. 6. P. 983–991. <https://doi.org/10.1111/ejss.12293>
- Chen S., Huang Y., Zou J., Shen Q., Hu Z., Qin Y., Chen H., Pan G. Modeling interannual variability of global soil respiration from climate and soil properties // Agricultural and Forest Meteorology. 2010. Vol. 150. Iss. 4. P. 590–605. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2010.02.004>
- Del Grosso S.J., Parton W.J., Mosier A.R., Holland E.A., Pendall E., Schimel D.S., Ojima D.S. Modeling soil CO₂ emissions from ecosystems // Biogeochemistry. 2005. Vol. 73. P. 71–91. <https://doi.org/10.1007/s10533-004-0898-z>
- Dyukarev E.A., Kurakov S.A. Response of Bare Soil Respiration to Air and Soil Temperature Variations According to Different Models: A Case Study of an Urban Grassland // Land. 2023. Vol. 12. Iss. 5. P. 939. <https://doi.org/10.3390/land12050939>
- Howard P.J.A., Howard D.M. Respiration of decomposing litter in relation to temperature and moisture // Oikos. 1979. Vol. 33. P. 457–465.
- Jarvis P., Rey A., Petsikos C., Wingate L., Rayment M., Pereira J., Banza J., David J., Miglietta F., Borghetti M., Manca G., Valentini R. Drying and wetting of Mediterranean soils stimulates decomposition and carbon dioxide emission: The "Birch effect" // Tree Physiology. 2007. Vol. 27. Iss. 7. P. 929–940. <https://doi.org/10.1093/treephys/27.7.929>
- Juhász C., Huzsvai L., Kovács E., Kovács G., Tuba G., Sinka L., Zsembeli J. Carbon Dioxide Efflux of Bare Soil as a Function of Soil Temperature and Moisture Content under Weather Conditions of Warm, Temperate, Dry Climate Zone // Agronomy. 2022. Vol. 12. Iss. 12. P. 3050. <https://doi.org/10.3390/agronomy12123050>
- Kayranli B., Scholz M., Mustafa A., Hedmark Å. Carbon Storage and Fluxes within Freshwater Wetlands: A Critical Review // Wetlands. 2010. Vol. 30. P. 111–124. <https://doi.org/10.1007/s13157-009-0003-4>
- Kivalov S.N., Lopes de Gerenyu V.O., Khoroshaev D.A., Myakshina T., Sapronov D., Ivashchenko K.V., Kurganova I.N. Soil Temperature, Organic-Carbon Storage, and Water-Holding Ability Should Be Accounted for the Empirical Soil Respiration Model Selection in Two Forest Ecosystems // Forests. 2023. Vol. 14. Iss. 8. P. 1568. <https://doi.org/10.3390/f14081568>
- Kurganova I.N., Lopes De Gerenyu V.O., Myakshina T.N., Sapronov D.V., Savin I.Y., Shorohova E.V. Carbon balance in forest ecosystems of southern part of Moscow region under a rising aridity of climate // Contemporary Problems of Ecology. 2017. Vol. 10. P. 748–760. <https://doi.org/10.1134/S1995425517070071>
- Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.O., Myakshina T.N., Sapronov D.V., Romashkin I.V., Zhmurin V.A., Kudayarov V.N. Experimental and model estimates of Respiration of forest sod-podzolic soil in Prioksko-Terrasny Nature Reserve // Contemporary Problems of Ecology. 2020. Vol. 13. P. 813–824. <https://doi.org/10.1134/S1995425520070057>
- Kurganova I., Lopes de Gerenyu V., Khoroshaev D., Myakshina T., Sapronov D., Zhmurin V. Temperature Sensitivity of Soil Respiration in Two Temperate Forest Ecosystems: The Synthesis of a 24-Year Continuous Observation // Forests. 2022. Vol. 13. Iss. 9. P. 1374. <https://doi.org/10.3390/f13091374>
- Lal R. Forest soils and carbon sequestration // Forest Ecology and Management. 2005. Vol. 220. Iss. 1–3. P. 242–258. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.08.015>
- Le Quéré C., Moriarty R., Andrew R.M. et al. Global carbon budget 2014 // Earth System Science Data. 2015. Vol. 7. Iss. 1. P. 47–85. <https://doi.org/10.5194/essd-7-47-2015>
- Lopes De Gerenyu V.O., Kurganova I.N., Rozanova L.N., Kudayarov V.N. Effect of temperature and moisture on CO₂ evolution rate of cultivated Phaeozem: analyses of long-term field experiment // Plant, Soil and Environment. Czech Academy of Agricultural Sciences. 2005. Vol. 51. Iss. 5. P. 213–219. <https://doi.org/10.17221/3576-PSE>
- Macdonald C.A., Anderson I.C., Khachane A., Singh B.P., Barton C.V.M., Duursma R.A., Ellsworth D.S., Singh B.K. Plant productivity is a key driver of soil respiration response to climate change in a nutrient-limited soil // Basic and Applied Ecology. 2021. Vol. 50. P. 155–168. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2020.12.005>
- Maier M., Schack-Kirchner H., Hildebrand E.E., Holst J. Pore-space CO₂ dynamics in a deep, well-aerated soil // European Journal of Soil Science. 2010. Vol. 61. Iss. 6. P. 877–887. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2010.01287.x>

- Monson R.K., Lipson D.L., Burns S.P., Turnipseed A.A., Delany A.C., Williams M.W., Schmidt S.K. Winter Forest soil respiration controlled by climate and microbial community composition // *Nature*. 2006. Vol. 439. P. 711–714.
- Neira J., Ortiz M., Morales L., Acevedo E. Oxygen diffusion in soils: Understanding the factors and processes needed for modeling // *Chilean Journal of Agricultural Research*. 2015. Vol. 75 (1). P. 35–44. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-58392015000300005>
- O'Connell A.M. Microbial decomposition (respiration) of litter in eucalypt forests of South-Western Australia: An empirical model based on laboratory incubations // *Soil Biology and Biochemistry*. 1990. Vol. 22. Iss. 2. P. 153–160. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(90\)90080-J](https://doi.org/10.1016/0038-0717(90)90080-J)
- Orchard V.A., Cook F.J. Relationship between soil respiration and soil moisture // *Soil Biology and Biochemistry*. 1983. Vol. 15. Iss. 4. P. 447–453. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(83\)90010-X](https://doi.org/10.1016/0038-0717(83)90010-X)
- Pavelka M., Darenova E., Dusek J. Modeling of soil CO₂ efflux during water table fluctuation based on in situ measured data from a sedge-grass marsh // *Applied Ecology and Environmental Research*. 2016. Vol. 14. No. 3. P. 423–437.
- Peltoniemi M., Thüring E., Ogle S., Palosuo T., Schrumpf M., Wutzler T., Butterbach-Bahl K., Chertov O., Komarov A., Mikhailov A., Gårdenäs A., Perry C., Liski J., Smith P., Mäkipää R. Models in country scale carbon accounting of forest soils // *Silva Fennica*. 2007. Vol. 41. Iss. 3. P. 575–602.
- Raich J.W., Potter C.S. Global patterns of carbon dioxide emission from soils // *Global Biogeochemical Cycles*. 1995. Vol. 9. Iss. 1. P. 23–36. <https://doi.org/10.1029/94GB02723>
- Ryan M., Law B. Interpreting, measuring, and modeling soil respiration // *Biogeochemistry*. 2005. Vol. 73. P. 3–27.
- Reichstein M., Rey A., Freibauer A. et al. Modeling temporal and large-scale spatial variability of soil respiration from soil water availability, temperature and vegetation productivity indices // *Global Biogeochemical Cycles*. 2003. Vol. 17. Iss. 4. P. 1104. DOI: <https://doi.org/10.1029/2003GB002035>
- Soil carbon storage: modulators, mechanisms and modeling / B.K. Singh (ed.). London: Academic Press, 2018. 311 p.
- UNFCCC 2006. National Inventory Submissions. URL: http://unfccc.int/national_reports/annex_i_ghg_inventories/national_inventories_submissions/items/3734.php (accessed on 10.01.2024).
- Valentini R., Matteucci G., Dolman A.J. et al. Respiration as the main determinant of carbon balance in European forests // *Nature*. 2000. Vol. 404. P. 861–865.
- IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome, 2014, update 2015. 181 p.
- Yuste J.C., Janssens I.A., Carrara A., Meiresonne L., Ceulemans R. Interactive effects of temperature and precipitation on soil respiration in a temperate maritime pine forest // *Tree Physiology*. 2003. Vol. 23. Iss. 18. P. 1263–1270. <https://doi.org/10.1093/treephys/23.18.1263>

Поступила в редакцию 28.02.2024

Принята 08.07.2024

Опубликована 22.07.2024

Сведения об авторах:

Кивалов Сергей Николаевич – PhD (физика атмосферы), кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории карбомониторинга наземных экосистем Института физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН – обособленное подразделение ФГБУН «Федеральный исследовательский центр «Пушкинский научный центр биологических исследований РАН» (г. Пушкино, Россия); snk2105@gmail.com

Курганова Ирина Николаевна – доктор биологических наук, главный научный сотрудник, заведующая лабораторией почвенных циклов азота и углерода Института физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН – обособленное подразделение ФГБУН «Федеральный исследовательский центр «Пушкинский научный центр биологических исследований РАН» (г. Пушкино, Россия); ikurg@mail.ru

Лопес Де Гереню Валентин Овидиович – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории почвенных циклов азота и углерода Института физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН – обособленное подразделение ФГБУН «Федеральный

исследовательский центр «Пушинский научный центр биологических исследований РАН» (г. Пушкино, Россия); vlopes@mail.ru

Мякшина Татьяна Николаевна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории почвенных циклов азота и углерода Института физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН – обособленное подразделение ФГБУН «Федеральный исследовательский центр «Пушинский научный центр биологических исследований РАН» (г. Пушкино, Россия); mtn59@mail.ru

Сапронов Дмитрий Васильевич – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории почвенных циклов азота и углерода Института физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН – обособленное подразделение ФГБУН «Федеральный исследовательский центр «Пушинский научный центр биологических исследований РАН» (г. Пушкино, Россия); sadmvas@gmail.com

Хорошаев Дмитрий Александрович – кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории карбомониторинга наземных экосистем Института физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН – обособленное подразделение ФГБУН «Федеральный исследовательский центр «Пушинский научный центр биологических исследований РАН» (г. Пушкино, Россия); dkhoroshaev@gmail.com

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.



Статья доступна по лицензии [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Application of the ensemble of T&P models for estimating the respiration of forest soils in the zone of temperate continental climate

© 2024 S. N. Kivalov , I. N. Kurganova , V. O. Lopez de Guerenу , T. N. Myakshina , D. V. Sapronov , D. A. Khoroshaev 

Institute of Physicochemical and Biological Problems of Soil Science of the Russian Academy of Sciences, Institutskaya Street, 2, Pushchino, Moscow region, Russia. E-mail: snk2105@gmail.com

The aim of the study was by using an ensemble of T&P models, i.e. empirical models of soil respiration dependent on temperature, precipitation and other meteorological and soil parameters, to show the dependence of the choice of optimal empirical models of soil respiration on the soil types in forest ecosystems, in this case Entic Podzol and Haplic Luvisol, as well as on options for parameterizing models using soil or air temperatures, precipitation and soil organic carbon stock.

Location and time of the study. Temperate continental climate zone of the Central Russia: mixed forest in the north shore of Oka River and deciduous forest on the south shore of Oka River. The data were collected in 1998–2022.

Methods. An ensemble of empirical models of soil respiration was used, linking soil respiration to monthly mean soil or air temperatures and precipitation and soil organic carbon stock. At the same time, a method for determining soil respiration at zero degrees was proposed based on the results of a comparative analysis of simulated data with field measurements.

Results. For the forest Entic Podzol, i.e. the well-drained soil poor in organic carbon, the model that relates soil respiration to soil temperature, precipitation and organic carbon storage was the best, whereas for Haplic Luvisol, i.e. the soil with good water retention capacity, the Reich-Hashtmoto model with a quadratic dependence on temperature at an exponent point was the best model.

Conclusions. When choosing optimal empirical models of soil respiration, it is important to take into account such soil parameters as organic carbon stock and the ability to retain water.

Keywords: modeling of soil respiration; Entic Podzol; Haplic Luvisol; forest ecosystems; ensemble of empirical models.

How to cite: Kivalov S.N., Kurganova I.N., Lopez de Guerenу V.O., Myakshina T.N., Sapronov D.V., Khoroshaev D.A. Application of T&P Models for Estimating Respiration of Forest Soils in the Temperate Continental Climate Zone. *The Journal of Soils and Environment*. 2024. 7(2). e252. DOI: [10.31251/pos.v7i2.252](https://doi.org/10.31251/pos.v7i2.252). (in Russian with English abstract).

FUNDING

The data collection and preparation were carried out as part of the most important innovative project of national importance, “Development of a system for ground-based and remote monitoring of carbon pools and greenhouse gas fluxes in the territory of the Russian Federation, ensuring the creation of recording data systems on the fluxes of climate-active substances and the carbon budget in forests and other terrestrial ecological systems” (registration No. 123030300031-6); the data analysis and modeling works were supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. 122111000095-8).

REFERENCES

- Ilyasov D.V., Molchanov A.G., Glagolev M.V., Suvorov G.G., Sirin A.A. Modelling of carbon dioxide net ecosystem exchange of hayfield on drained peat soil: land use scenario analysis. *Computer Research and Modeling*. 2020. Vol. 12. No. 6. P. 1427–1449. <https://doi.org/10.20537/2076-7633-2020-12-6-1427-1449>
- Karelin D.V., Zamolodchikov D.G., Isaev A.S. Unconsidered sporadic sources of carbon dioxide emission from soils in taiga forests. *Doklady Biological Sciences*. 2017. Vol. 475. No. 1. P. 165–168. <https://doi.org/10.1134/S0012496617040093>
- Classification and diagnostics of soils of the USSR / Compiled by: V.V. Egorov, V.M. Friedland, E.N. Ivanova, N.N. Rozova, V.A. Nosin, T.A. Frieв. Moscow: Kolos Publ., 1977. 224 p. (in Russian).
- Marchik T.P., Efremov A.L. Soil science with the basics of plant growing. Grodno: GrSU, 2006. 249 p. (in Russian). https://ebooks.grsu.by/pochva_s_osn_rast/index.htm
- Makhnykina A.V., Polosukhina D.A., Kolosov R.A., Prokushkin A.S. Seasonal dynamics of CO₂ emission from the surface of the raised bog in Central Siberia. *Geosphere Research*. 2021. Vol. 4. P. 85–93. (in Russian). <https://doi.org/10.17223/25421379/21/7>
- Sukhoveeva O.E., Karelin D.V. Assessment of Soil Respiration with the Raich–Hashimoto Model: Parameterisation and Prediction. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*. 2022. Vol. 86. No. 4. P. 519–527. (in Russian). <https://doi.org/10.31857/S2587556622030153>
- Vygodskaya N.N., Varlagin A.V., Kurbatova Y.A., Ol’chev A.V., Panferov O.I., Tatarinov F.A., Shalukhina N.V. Response of taiga ecosystems to extreme weather conditions and climate anomalies. *Doklady Biological Sciences*. 2009. Vol. 429. No. 6. P. 571–574. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0012496609060258>
- Brown R.B. Soil Texture. *Agronomy Fact Sheet Series SL-29*. Department of Crop and Soil Sciences. Cornell University, 2007. <http://nmsp.cals.cornell.edu/publications/factsheets/factsheet29.pdf>
- Chamindu Deepagoda T.K.K., Elberling B. Characterization of diffusivity-based oxygen transport in Arctic organic soil. *European Journal of Soil Science*. 2015. Vol. 66. Iss. 6. P. 983–991. <https://doi.org/10.1111/ejss.12293>
- Chen S., Huang Y., Zou J., Shen Q., Hu Z., Qin Y., Chen H., Pan G. Modeling interannual variability of global soil respiration from climate and soil properties. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2010. Vol. 150. Iss. 4. P. 590–605. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2010.02.004>
- Del Grosso S.J., Parton W.J., Mosier A.R., Holland E.A., Pendall E., Schimel D.S., Ojima D.S. Modeling soil CO₂ emissions from ecosystems. *Biogeochemistry*. 2005. Vol. 73. P. 71–91. <https://doi.org/10.1007/s10533-004-0898-z>
- Dyukarev E.A., Kurakov S.A. Response of Bare Soil Respiration to Air and Soil Temperature Variations According to Different Models: A Case Study of an Urban Grassland. *Land*. 2023. Vol. 12. Iss. 5. P. 939. <https://doi.org/10.3390/land12050939>
- Howard P.J.A., Howard D.M. Respiration of decomposing litter in relation to temperature and moisture. *Oikos*. 1979. Vol. 33. P. 457–465.
- Jarvis P., Rey A., Petsikos C., Wingate L., Rayment M., Pereira J., Banza J., David J., Miglietta F., Borghetti M., Manca G., Valentini R. Drying and wetting of Mediterranean soils stimulates decomposition and carbon dioxide emission: The “Birch effect”. *Tree Physiology*. 2007. Vol. 27. Iss. 7. P. 929–940. <https://doi.org/10.1093/treephys/27.7.929>
- Juhász C., Huzsvai L., Kovács E., Kovács G., Tuba G., Sinka L., Zsembeli J. Carbon Dioxide Efflux of Bare Soil as a Function of Soil Temperature and Moisture Content under Weather Conditions of Warm, Temperate, Dry Climate Zone. *Agronomy*. 2022. Vol. 12. Iss. 12. P. 3050. <https://doi.org/10.3390/agronomy12123050>
- Kayranli B., Scholz M., Mustafa A., Hedmark Å. Carbon Storage and Fluxes within Freshwater Wetlands: A Critical Review. *Wetlands*. 2010. Vol. 30. P. 111–124. <https://doi.org/10.1007/s13157-009-0003-4>

- Kivalov S.N., Lopes de Gerenyu V.O., Khoroshaev D.A., Myakshina T., Sapronov D., Ivashchenko K.V., Kurganova I.N. Soil Temperature, Organic-Carbon Storage, and Water-Holding Ability Should Be Accounted for the Empirical Soil Respiration Model Selection in Two Forest Ecosystems. *Forests*. 2023. Vol. 14. Iss. 8. P. 1568. <https://doi.org/10.3390/f14081568>
- Kurganova I.N., Lopes De Gerenyu V.O., Myakshina T.N., Sapronov D.V., Savin I.Y., Shorohova E.V. Carbon balance in forest ecosystems of southern part of Moscow region under a rising aridity of climate. *Contemporary Problems of Ecology*. 2017. Vol. 10. P. 748–760. <https://doi.org/10.1134/S1995425517070071>
- Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.O., Myakshina T.N., Sapronov D.V., Romashkin I.V., Zhmurin V.A., Kuderyarov V.N. Experimental and model estimates of Respiration of forest sod-podzolic soil in Prioksko-Terrasny Nature Reserve. *Contemporary Problems of Ecology*. 2020. Vol. 13. P. 813–824. <https://doi.org/10.1134/S1995425520070057>
- Kurganova I., Lopes de Gerenyu V., Khoroshaev D., Myakshina T., Sapronov D., Zhmurin V. Temperature Sensitivity of Soil Respiration in Two Temperate Forest Ecosystems: The Synthesis of a 24-Year Continuous Observation. *Forests*. 2022. Vol. 13. Iss. 9. P. 1374. <https://doi.org/10.3390/f13091374>
- Lal R. Forest soils and carbon sequestration. *Forest Ecology and Management*. 2005. Vol. 220. Iss. 1–3. P. 242–258. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.08.015>
- Le Quéré C., Moriarty R., Andrew R.M. et al. Global carbon budget 2014. *Earth System Science Data*. 2015. Vol. 7. Iss. 1. P. 47–85. <https://doi.org/10.5194/essd-7-47-2015>
- Lopes De Gerenyu V.O., Kurganova I.N., Rozanova L.N., Kuderyarov V.N. Effect of temperature and moisture on CO₂ evolution rate of cultivated Phaeozem: analyses of long-term field experiment. *Plant, Soil and Environment*. Czech Academy of Agricultural Sciences. 2005. Vol. 51. Iss. 5. P. 213–219. <https://doi.org/10.17221/3576-PSE>
- Macdonald C.A., Anderson I.C., Khachane A., Singh B.P., Barton C.V.M., Duursma R.A., Ellsworth D.S., Singh B.K. Plant productivity is a key driver of soil respiration response to climate change in a nutrient-limited soil. *Basic and Applied Ecology*. 2021. Vol. 50. P. 155–168. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2020.12.005>
- Maier M., Schack-Kirchner H., Hildebrand E.E., Holst J. Pore-space CO₂ dynamics in a deep, well-aerated soil. *European Journal of Soil Science*. 2010. Vol. 61. Iss. 6. P. 877–887. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2010.01287.x>
- Monson R.K., Lipson D.L., Burns S.P., Turnipseed A.A., Delany A.C., Williams M.W., Schmidt S.K. Winter Forest soil respiration controlled by climate and microbial community composition. *Nature*. 2006. Vol. 439. P. 711–714.
- Neira J., Ortiz M., Morales L., Acevedo E. Oxygen diffusion in soils: Understanding the factors and processes needed for modeling. *Chilean Journal of Agricultural Research* 2015. Vol. 75 (1). P. 35–44. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-58392015000300005>
- O'Connell A.M. Microbial decomposition (respiration) of litter in eucalypt forests of South-Western Australia: An empirical model based on laboratory incubations. *Soil Biology and Biochemistry*. 1990. Vol. 22. Iss. 2. P. 153–160. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(90\)90080-J](https://doi.org/10.1016/0038-0717(90)90080-J)
- Orchard V.A., Cook F.J. Relationship between soil respiration and soil moisture. *Soil Biology and Biochemistry*. 1983. Vol. 15. Iss. 4. P. 447–453. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(83\)90010-X](https://doi.org/10.1016/0038-0717(83)90010-X)
- Pavelka M., Darenova E., Dusek J. Modeling of soil CO₂ efflux during water table fluctuation based on in situ measured data from a sedge-grass marsh. *Applied Ecology and Environmental Research*. 2016. Vol. 14. No. 3. P. 423–437.
- Peltoniemi M., Thürig E., Ogle S., Palosuo T., Schrumph M., Wutzler T., Butterbach-Bahl K., Chertov O., Komarov A., Mikhailov A., Gärdenäs A., Perry C., Liski J., Smith P., Mäkipää R. Models in country scale carbon accounting of forest soils. *Silva Fennica*. 2007. Vol. 41. Iss. 3. P. 575–602.
- Raich J.W., Potter C.S. Global patterns of carbon dioxide emission from soils. *Global Biogeochemical Cycles*. 1995. Vol. 9. Iss. 1. P. 23–36. <https://doi.org/10.1029/94GB02723>
- Ryan M., Law B. Interpreting, measuring, and modeling soil respiration. *Biogeochemistry*. 2005. Vol. 73. P. 3–27.
- Reichstein M., Rey A., Freibauer A. et al. Modeling temporal and large-scale spatial variability of soil respiration from soil water availability, temperature and vegetation productivity indices. *Global Biogeochemical Cycles*. 2003. Vol. 17. Iss. 4. P. 1104. <https://doi.org/10.1029/2003GB002035>
- Soil carbon storage: modulators, mechanisms and modeling / B.K. Singh (ed.). London: Academic Press, 2018. 311 p.
- UNFCCC 2006. National Inventory Submissions. URL: http://unfccc.int/national_reports/annex_i_ghg_inventories/national_inventories_submissions/items/3734.php (accessed on 10.01.2024).

Valentini R., Matteucci G., Dolman A.J. et al. Respiration as the main determinant of carbon balance in European forests. *Nature*. 2000. Vol. 404. P. 861–865.

IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome, 2014, update 2015. 181 p.

Yuste J.C., Janssens I.A., Carrara A., Meiresonne L., Ceulemans R. Interactive effects of temperature and precipitation on soil respiration in a temperate maritime pine forest. *Tree Physiology*. 2003. Vol. 23. Iss. 18. P. 1263–1270. <https://doi.org/10.1093/treephys/23.18.1263>

Received 22 February 2024

Accepted 08 July 2024

Published 22 July 2024

About the authors:

Sergey N. Kivalov – PhD (Atmospheric Sciences), Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher in the Laboratory of Carbomonitoring of Terrestrial Ecosystems in the Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science of the Russian Academy of Sciences (Pushchino, Russia); snk2105@gmail.com

Irina N. Kurganova – Doctor of Biological Sciences, Head of the Laboratory of Soil Cycles of Nitrogen and Carbon in the Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science of the Russian Academy of Sciences (Pushchino, Russia); ikurg@mail.ru

Valentin O. Lopes De Gerenyu – Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher in the Laboratory of Soil Cycles of Nitrogen and Carbon in the Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science of the Russian Academy of Sciences (Pushchino, Russia); vlopes@mail.ru

Tatyana N. Myakshina – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher in the Laboratory of Soil Cycles of Nitrogen and Carbon in the Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science of the Russian Academy of Sciences (Pushchino, Russia); mtn59@mail.ru

Dmitriy V. Sapronov – Candidate of Biological Sciences, Leading Researcher in the Laboratory of Soil Cycles of Nitrogen and Carbon in the Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science of the Russian Academy of Sciences (Pushchino, Russia); sadmvas@gmail.com

Dmitriy A. Khoroshaev – Candidate of Biological Sciences, Researcher in the Laboratory of Carbomonitoring of Terrestrial Ecosystems in the Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science of the Russian Academy of Sciences (Pushchino, Russia); dkhoroshaev@gmail.com

The authors read and approved the final manuscript



The article is available under [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

УДК 631.4

<https://doi.org/10.31251/pos.v7i2.260>

Сравнительная оценка методов седиментометрии при определении гранулометрического состава почв

© 2024 А. К. Ходжаева ¹, С. В. Масликова ², Н. С. Горбунова ²

¹Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН – обособленное подразделение ФГБУН «Федеральный исследовательский центр «Пушкинский научный центр биологических исследований РАН», ул. Институтская, д. 2, корпус 2, г. Пушкино, Московская обл., 142290, Россия.

E-mail: khodzhaeva@pbcras.ru

²ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», Университетская площадь, д. 1, г. Воронеж, 394018, Россия. E-mail: sveta.maslikova.01@mail.ru

Цель исследования. Провести сравнительный анализ результатов определений гранулометрического состава разных типов почв пипет-методом и с помощью измерительной системы почвенных частиц PARIO, с использованием расширенного метода определения интегрального давления суспензии (далее – ISP+).

Место и время проведения. Работа выполнена в ЦКП «Физико-химические методы исследования почв и экосистем» и отделе «Криологии почв» Института физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН.

Методы. Определение гранулометрического состава почв проводили пипет-методом и ISP+. Статистическую обработку результатов анализов выполнили с помощью Microsoft Excel и Statistica 12.

Основные результаты. Определение степени расхождения результатов повторных определений гранулометрического состава почв, полученных пипет-методом и ISP+ показало, что для разных фракций коэффициенты вариации различны. Высокая воспроизводимость результатов определений при использовании обоих сравниваемых методов получена для глинистой фракции. Для фракций крупной и средней пыли значения коэффициентов вариации не превышали 10–20%. Самый большой разброс значений повторных определений при использовании обоих методов получен для фракции тонкой пыли. Проведённая оценка значимости различий между средними для фракций тонкой пыли и глины пипет-методом и ISP+ показала, что значимых расхождений нет. Для крупной и средней пыли такая оценка показала значимые различия. 14 из 17-ти исследованных почвенных образцов по результатам определений гранулометрического состава сравниваемыми методами получили одинаковую классификационную принадлежность.

Заключение. Использование измерительной системы почвенных частиц PARIO для определения гранулометрического состава почв позволяет исключить механическое вмешательство в процесс осаждения, отслеживание точности глубины и времени отборов проб, а также значительно сокращает время, затрачиваемое на проведение анализа. Метод ISP+, используемый в работе системы PARIO, даёт возможность получить непрерывную кривую распределения элементарных почвенных частиц по размеру. Проведённое сравнение результатов определения содержания гранулометрических фракций в разных типах почв выявило необходимость принимать во внимание конкретные методы, так как результаты могут расходиться, особенно для фракций крупной и средней пыли, и это может влиять на классификацию почв.

Ключевые слова: гранулометрический состав почвы; пипет-метод; расширенный метод определения интегрального давления суспензии (ISP+); измерительная система почвенных частиц PARIO.

Цитирование: Ходжаева А.К., Масликова С.В., Горбунова Н.С. Сравнительная оценка методов седиментометрии при определении гранулометрического состава почв // Почвы и окружающая среда. 2024. Том 7. № 2. с.260. DOI: [10.31251/pos.v7i2.260](https://doi.org/10.31251/pos.v7i2.260).

ВВЕДЕНИЕ

Гранулометрический состав почв – важная характеристика, определяющая их плотность, порозность, водопроницаемость, фильтрацию, влагоемкость, а также водный, тепловой режимы и плодородие. Это одна из базовых количественных характеристик почв при проведении их описания и оценки (Руководство по описанию почв, 2012; Богатырев и др., 2017). Для определения гранулометрического состава используют ряд методов, основанных на разных подходах (Вадюнина, Корчагина, 1986; Теории и методы ..., 2007; Vuurman et al., 1997; Soil Survey ..., 2014; ISO 13320:2020). Методы отмучивания почвенных частиц в стоячей воде (методы седиментометрии), получившие широкое распространение в XX веке, основаны на использовании уравнения Стокса, связующего радиус частиц и скорость их оседания в жидкости (Вадюнина, Корчагина, 1986; Soil Survey ..., 2014).

Количественное определение **элементарных почвенных частиц (ЭПЧ)** разного размера при использовании методов седиментометрии можно осуществлять, отбирая пробы суспензии с определенной глубины, через рассчитанные промежутки времени – пипет-метод, измеряя изменение плотности суспензии по мере осаждения ЭПЧ разного размера с помощью ареометров или седиграфов (Вадюнина, Корчагина, 1986; Теории и методы ..., 2007; ГОСТ 12536-2014; ISO 11277:2020). Диапазон определяемых этими методами ЭПЧ составляет от $> 0,001$ до $< 0,25$ мм. Содержание фракций песка устанавливают отсеиванием на ситах. В англоязычной научной литературе такой комбинированный подход получил название «sieve-pipette method» (Теории и методы ..., 2007). Сравнение методов седиментометрии и метода лазерной дифрактометрии, в котором размер ЭПЧ определяют не по косвенным признакам, а непосредственно фиксируя датчиками, говорят не в пользу первых (Федотов и др., 2007; Кулижский и др., 2010; Юдина и др., 2018, 2020; Болдырева и др., 2019; Shein et al., 2006). Тем не менее, методы седиментометрии до сих пор остаются востребованными, что объясняется их простотой, невысокими материальными затратами и, самое важное, существующими классификационными и методическими подходами, разработанными на их основе (ГОСТ 12536-2014; ISO 11277:2020; Болдырева и др., 2019). Однако простота, например, пипет-метода, относительна. Анализ очень трудоёмок: его продолжительность может занимать до 30-ти часов, в процессе необходимо задействовать много стеклянной посуды, на точность получаемых результатов оказывают влияние колебания температуры, вибрация, человеческий фактор и др. Возможность значительно снизить трудоёмкость анализов и влияние субъективного фактора на получаемые результаты даёт разработанная компанией METER Group AG (Мюнхен, Германия) измерительная система почвенных частиц PARIO, в работе которой использован метод интегрального давления суспензии (ISP). В этом методе по измерению падения давления на датчике давления, погруженного в суспензию на определенную глубину, получают распределение частиц по размерам. Давление суспензии измеряется непрерывно, а распределение частиц по размерам определяют путём обратного моделирования (Durner et al., 2017; Durner, Iden, 2021). Проведение сравнения результатов определений гранулометрического состава разных типов почв пипет-методом и с помощью измерительной системы почвенных частиц PARIO, позволит оценить сходства и расхождения между ними и выявить особенности использования системы для изучения гранулометрического состава почв.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для сравнения методов выбрали образцы 12-ти типов почв, отобранных в полевых экспедициях сотрудниками Института физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН. Для классификации почв использовали российскую классификацию 2004 года (Классификация ..., 2004). Всего проанализировано 17 почвенных образцов (табл. 1).

Органическое вещество, карбонаты, легкорастворимые соли, гипс и др. оказывают агрегирующее действие и могут препятствовать разделению почвенной массы на ЭПЧ (Вадюнина, Корчагина, 1986; Теории и методы ..., 2007; ISO 11277:2020), поэтому перед определением гранулометрического состава в почвенных образцах определяли содержание общего органического углерода ($C_{орг}$, %) методом мокрого сжигания по Тюрину; гипса ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$, %) солянокислым методом; величину актуальной кислотности (pH_{H_2O}) – потенциометрически, измеряя pH водных почвенных суспензий при соотношении массы почвы и объема воды равном 1:2,5 (Теория и практика ..., 2004) и удельной электропроводности (ЕС, См/м) по ГОСТ 26423-85. Повторность выполняемых анализов двукратная. По результатам этих определений образцы разделили на две группы: не требующие дополнительной обработки для нейтрализации связующих элементарные почвенные частицы агентов (с содержанием гумуса $< 1,5\%$, ЕС $< 0,04$ См/м, $pH_{H_2O} < 6,8$) и требующие. Для удаления органического вещества почвенные пробы обрабатывали 30%-ным раствором H_2O_2 при активном перемешивании и слабом нагреве ($40^\circ C$). Для удаления карбонатов пробы обрабатывали 1 М раствором HCl. Для удаления легкорастворимых солей пробы промывали порциями дистиллированной воды, контроль осуществляли измеряя ЕС ($< 0,04$ См/м) (ISO 11277:2020). Плотность твёрдой фазы (ρ_s , г/см³) в образцах обеих групп определяли методом водных пикнометров (Теории и методы ..., 2007); повторность двукратная. Полученные величины плотности твёрдой фазы использовали для расчетов времени отбора проб суспензий при проведении анализа пипет-методом (Теории и методы ..., 2007) и ввода данных о почвенном образце через экран управления PARIO Control перед началом анализа измерительной системой.

Таблица 1

Химические, физико-химические и физические характеристики почв

Почва	Глубина (см)	pH _{H2O}	ЕС (См/м)	C _{орг} (%)	CaSO ₄ ·2H ₂ O (%)	ρ _s (г/см ³)
Дерново-подбур (1)*	0–10	5,53	0,01	2,95±0,05	–	2,55
Серая (2)	0–20	5,51	0,01	0,98±0,10	–	2,67
Чернозем глинисто-иллювиальный (3–4)	20–30	6,83	0,01	1,29±0,19	–	2,70
	30–40	6,72	0,01	1,55±0,01	–	2,69
Стратозем темногумусовый (5–6)	20–30	7,56	0,01	1,25±0,03	–	2,58
	30–40	7,77	0,01	1,26±0,02	–	2,66
Чернозем текстурно-карбонатный (7–8)	20–30	7,90	0,02	1,94±0,07	–	2,62
	30–40	8,12	0,02	1,55±0,07	–	2,58
Дерново-карбонатная (9)	1,5–8	7,20	0,01	12,28±0,11	–	2,22
Темная слитая (10)	0–10	7,60	0,02	2,54±0,04	–	2,49
Желтозем (11)	0–25	6,28	0,01	1,61±0,02	–	2,63
Краснозем (12)	0–25	5,62	0,00	1,44±0,02	–	2,72
Каштановая (13–14)	0–10	6,97	0,01	0,76±0,03	–	2,65
	10–20	7,23	0,00	0,56±0,02	–	2,65
Солонец светлый (15)	5–20	8,30	0,06	1,72±0,07	0,01±0,00	2,51
Солончак (16–17)	0–10	7,49	2,52	0,86±0,02	13,93±0,01	2,56
	10–20	8,05	0,76	0,70±0,02	8,56±0,02	2,62

Примечание.

* – номер образца (здесь и далее в табл. 2). Представлены такие характеристики почв как актуальная кислотность (pH_{H2O}); удельная электропроводность (ЕС); содержание общего органического углерода (C_{орг}) и гипса (CaSO₄·2H₂O) в виде среднего арифметического значения и стандартного отклонения (M±s); плотность твёрдой фазы (ρ_s). Прочерк означает, что гипс отсутствует.

Анализ гранулометрического состава включал два этапа: диспергирование почвенной массы и определение содержания элементарных почвенных частиц установленных размеров. Первый этап выполняли одинаково для обоих методов. Навески воздушно-сухих почвенных образцов (для песчаных почв – 20 г абсолютно сухого образца (методом ISP+ – 40 г), для суглинистых и глинистых – 10 г (методом ISP+ – не менее 25 г) помещали в стеклянные флаконы, добавляли 200 мл деаэрированной дистиллированной воды и 25 мл 4% раствора Na₄P₂O₇ (PARIO Manual, 2024). Затем почвенная проба во флаконе с водой и пиродифосфатом натрия подвергалась обработке **ультразвуком (УЗ)**, для чего использовали ультразвуковой диспергатор МЭФ93.Т компании МЭЛФИЗ (Россия). Уровень энергии диспергации УЗ составлял 450 Дж/мл. Далее приступали ко второму этапу. Определение гранулометрического состава с использованием измерительной системы PARIO проводили методом измерения интегрального давления суспензии (ISP). Оценку данных измерений осуществляли, используя программное обеспечение PARIO Control, в котором реализованы два метода: PARIO Classic (ISP) и PARIO Plus (ISP+). В методе PARIO Classic измерение полностью автоматизировано, в PARIO Plus – частично. В данной работе использовали метод ISP+, который имеет более высокую точность получения кривой гранулометрического состава (особенно для глинистой фракции), меньшую продолжительность измерения (2,5 часа по сравнению с 8-ю часами для ISP); ошибки, возникающие из-за неточностей в результатах предварительных анализов почвенных образцов или отклонений от неидеальных условий измерений, в меньшей степени влияют на результаты измерений (Durner, Iden, 2021). Определение содержания фракций песка выполняли просеиванием на ситах после завершения работы измерительной системы PARIO, пропуская весь объем почвенной суспензии через набор сит с ячейками 500, 250 и 50 мкм и тщательно промывая осадок дистиллированной водой. Анализ и

необходимые расчёты для определения гранулометрического состава почв пипет-методом проводили согласно методике, описанной в коллективной монографии «Теории и методы физики почв» (2007). Результаты содержания фракций крупного и среднего песка, полученные просеиванием при выполнении измерений системой PARIO, использовали и для пипет-метода. Содержание фракции мелкого песка при использовании пипет-метода находили по разности 100% и суммы определенных фракций (Теории и методы ..., 2007); повторность трёхкратная. В программном обеспечении PARIO Control реализована возможность использования двух классификаций ЭПЧ Германии и Министерства сельского хозяйства США (Keys to Soil Taxonomy, 2014). В работе использовали классификацию Министерства сельского хозяйства США (фракция крупного песка – 500–2000 мкм; среднего песка – 250–500 мкм; мелкого песка – 50–250 мкм; крупной пыли – 20–50 мкм; средней пыли – 5–20 мкм; тонкой пыли – 2–5 мкм; глины – <2 мкм). Статистическую обработку результатов определений гранулометрического состава разных типов почв, полученных пипет-методом и ISP+, проводили с использованием программного обеспечения Microsoft Excel и Statistica 12.

Определение степени расхождения результатов повторных определений содержания фракций гранулометрических частиц в образцах разных типов почв, полученных пипет-методом и ISP+ показало, что для разных фракций **коэффициенты вариации (CV)** различны. Высокая воспроизводимость результатов при использовании обоих методов получена для глинистой фракции (<2 мкм), для которой значения CV не превышали 10% и лишь при анализе образцов серой, каштановой (10–20 см) почв и дерново-подбура пипет-методом увеличились до 12, 14 и 20%, соответственно. Для фракций крупного (500–2000 мкм) и среднего песка (250–500 мкм) величины CV в большинстве случаев, не превышали 20%, однако при анализе образцов чернозема глинисто-иллювиального (30–40 см) получены высокие значения коэффициента вариации (>33%). Средняя воспроизводимость результатов, полученных расчетным методом и мокрым ситовым просеиванием определена для фракции мелкого песка (50–250 мкм), где величины CV не превышали 10–20%, за исключением расчётных величин для темной слитой почвы (CV >33%). Для фракций крупной (20–50 мкм) и средней пыли (5–20 мкм) воспроизводимость результатов была средняя (CV не превышал 10–20%); лишь при анализе образцов каштановой почвы (10–20 см) и солончака (10–20 см), выполненном методом ISP+, величины CV для фракции средней пыли были высокие (>33%). Самый большой разброс значений повторных определений получен для фракции тонкой пыли (2–5 мкм) образцов дерново-подбура, чернозема текстурно-карбонатного (30–40 см), солончака (0–10 см) и каштановой почвы (10–20 см) при использовании пипет-метода, а образцов чернозема глинисто-иллювиального (30–40 см), краснозема и солончака (10–20 см) – при использовании метода ISP+.

Средние значения содержания фракций средней, тонкой пыли и глины в большинстве случаев были выше при использовании пипет-метода по сравнению с методом ISP+. Средние значения содержания фракции крупной пыли во всех исследуемых почвенных образцах выше при анализе методом ISP+ (табл. 2). На рисунках 1–3 представлены кумулятивные кривые и треугольники Ферре для классификации почв по гранулометрическому составу. Метод интегрального давления суспензии, используемый в работе системы PARIO, даёт возможность получить непрерывную кривую распределения ЭПЧ по размеру. По кумулятивным кривым серой (2), чернозема глинисто-иллювиального (3–4), чернозема текстурно-карбонатного (7–8), краснозема (12), каштановой почвы (13–14) и солонца (15) хорошо видны расхождения в результатах определений фракций гранулометрических частиц сравниваемыми методами. Наибольшие расхождения получены во фракциях пыли и глины для серой почвы, мелкого песка, пыли и глины для краснозема и каштановой почвы. Гранулометрический состав серой почвы, определенный пипет-методом, представляет пылеватый оглиненный суглинок (пылеватую глину – согласно российской номенклатуре (Теории и методы ..., 2007)), а методом ISP+ – пылеватый суглинок (тяжёлый суглинок). Гранулометрический состав краснозема, определенный пипет-методом, глинистый, а методом ISP+ – илистый суглинок. Гранулометрический состав каштановой почвы (0–10 см), определенный пипет-методом, суглинистый, а методом ISP+ – опесчаненный суглинок (лёгкий суглинок). Сопоставление результатов анализа гранулометрического состава, полученные сравниваемыми методами, для дерново-подбура, чернозема глинисто-иллювиального, стратозема темногумусового, чернозема текстурно-карбонатного, дерново-карбонатной почвы, темной слитой, желтозема, каштановой (10–20 см), солонца и солончака показало, что в обоих случаях почвы получают одинаковую классификационную принадлежность, несмотря на некоторые расхождения в содержании фракций (табл. 2; рис. 1–3). Таким образом, 14 из 17-ти исследованных почвенных образцов по результатам определений гранулометрического состава пипет-методом и ISP+ получили одинаковую классификационную принадлежность.

Таблица 2

Гранулометрический состав разных типов почв при определении пипет-методом (I) и ISP+ (II)

Почва	Глубина (см)	Метод	Содержание фракций (%) с размером частиц (мкм)						
			Песок (sand)*			Пыль (silt)			Глина (clay)
			500–2000	250–500	50–250	20–50	5–20	2–5	< 2
Дерново-подбур (1)	0–10	I	38,34	37,35	13,78	1,84	2,92	1,58	4,19
		II			11,54	4,37	3,52	1,13	3,75
Серая (2)	0–20	I	0,18	0,48	12,48	26,49	28,61	5,13	26,63
		II			13,71	34,06	23,34	6,19	22,04
Чернозем глинисто-иллювиальный (3–4)	20–30	I	0,34	0,37	16,07	21,81	20,37	6,40	34,64
		II			17,76	30,19	13,85	4,24	33,25
	30–40	I	0,22	0,12	13,29	27,45	18,94	5,00	34,98
		II			17,02	32,36	19,00	0,00	31,29
Стратозем темногумусовый (5–6)	20–30	I	1,80	22,21	35,84	8,66	6,37	3,16	21,96
		II			31,27	17,30	4,05	2,06	21,31
	30–40	I	2,36	27,58	35,07	10,40	4,38	2,75	17,46
		II			32,65	17,85	2,33	3,14	15,09
Чернозем текстурно-карбонатный (7–8)	20–30	I	1,19	4,39	4,39	10,33	18,23	11,35	50,12
		II			7,18	18,53	9,73	6,98	52,00
	30–40	I	1,31	4,12	4,01	9,77	18,12	7,01	55,66
		II			6,61	16,28	10,16	8,51	53,01
Дерново-карбонатная (9)	1,5–8	I	2,32	0,82	9,08	7,96	17,01	10,57	52,24
		II			3,50	9,40	19,21	11,38	53,35
Темная слитая (10)	0–10	I	5,97	2,18	1,11	10,72	10,15	5,37	64,50
		II			4,75	11,63	7,48	7,44	60,55
Желтозем (11)	0–25	I	6,15	4,24	11,47	7,39	28,62	15,51	26,62
		II			10,44	12,49	23,93	14,37	28,38
Краснозем (12)	0–25	I	14,23	5,70	5,13	10,87	15,61	2,73	45,72
		II			12,38	18,75	15,92	0,05	32,97
Каштановая (13–14)	0–10	I	1,54	13,91	33,38	12,85	11,56	4,21	22,55
		II			41,22	22,60	3,07	1,87	15,79
	10–20	I	2,00	12,24	44,43	10,56	11,03	5,01	14,73
		II			40,41	20,92	3,84	3,00	17,59
Солонец светлый (15)	5–20	I	0,21	1,41	12,68	21,83	20,29	6,70	36,88
		II			12,43	32,85	9,84	7,26	36,00
Солончак (16–17)	0–10	I	1,09	5,86	66,26	6,74	3,30	1,46	15,29
		II			61,02	10,81	4,38	4,98	11,86
	10–20	I	0,98	6,72	68,31	5,22	3,49	2,54	12,74
		II			64,66	12,59	0,00	0,03	15,02

Примечание.

ISP+ – расширенный метод определения интегрального давления суспензии с помощью измерительной системы почвенных частиц PARIO. * – определение содержания фракций крупного и среднего песка выполняли просеиванием на ситах и использовали в методах I и II.

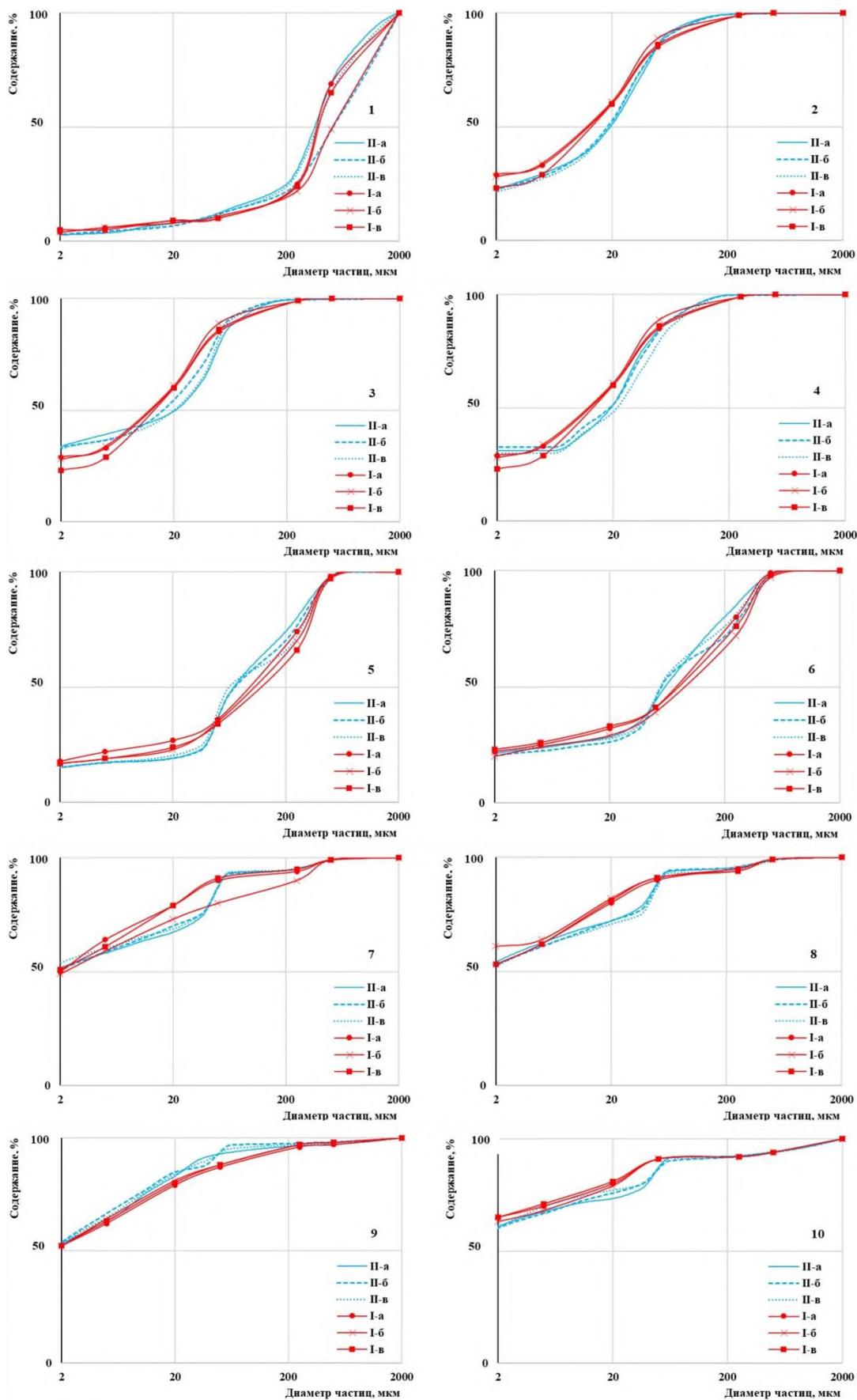


Рисунок 1. Кумулятивные кривые гранулометрического состава разных типов почв (1–10), полученных пипет-методом (I-а, I-б, I-в) и методом ISP+ (II-а, II-б, II-в) с определением интегрального давления суспензии с помощью измерительной системы почвенных частиц PARIO (здесь и далее на рис. 2–3).

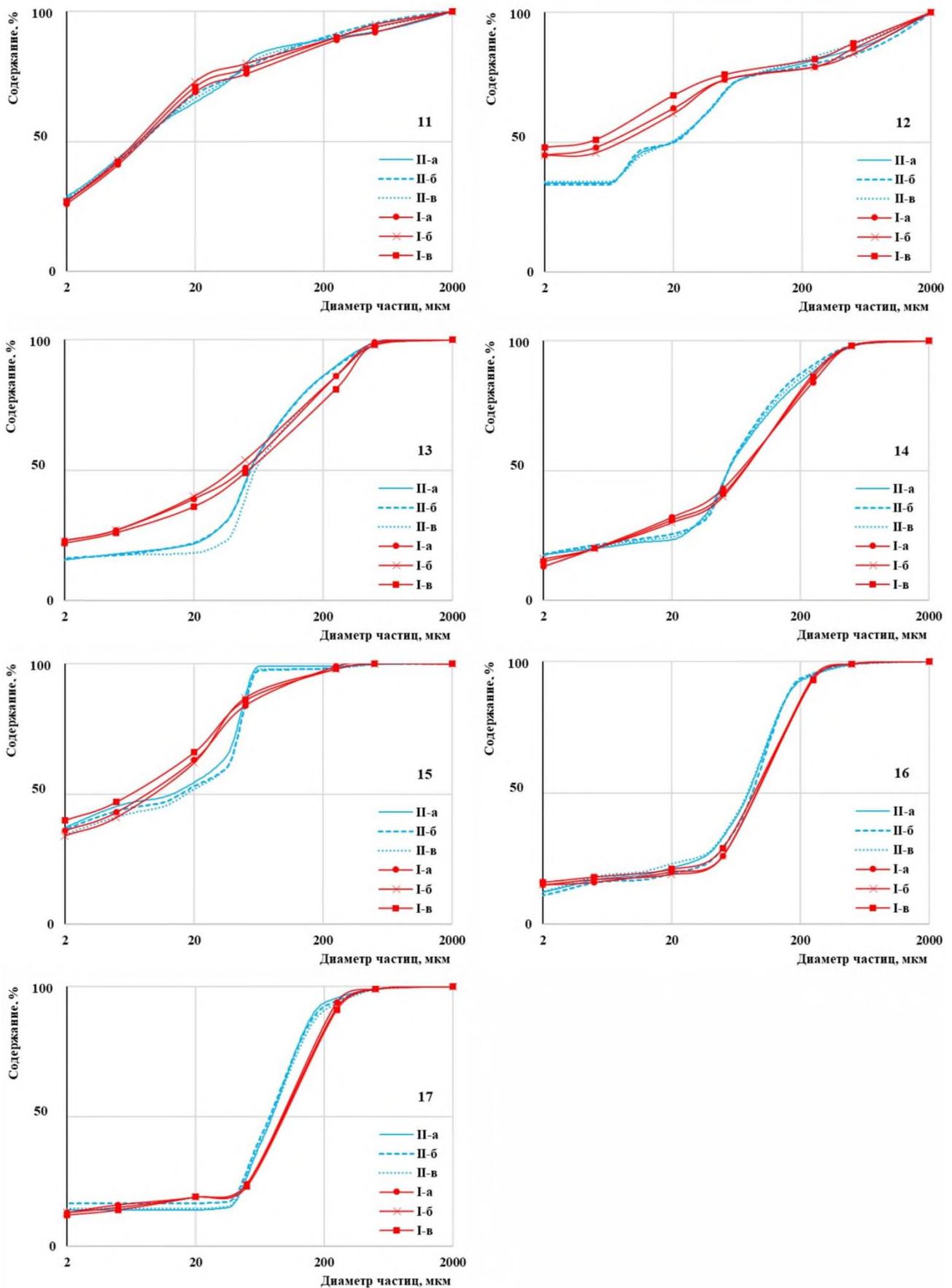


Рисунок 2. Кумулятивные кривые гранулометрического состава разных типов почв (11–17), полученных пипет-методом (I-а, I-б, I-в) и методом ISP+ (II-а, II-б, II-в)

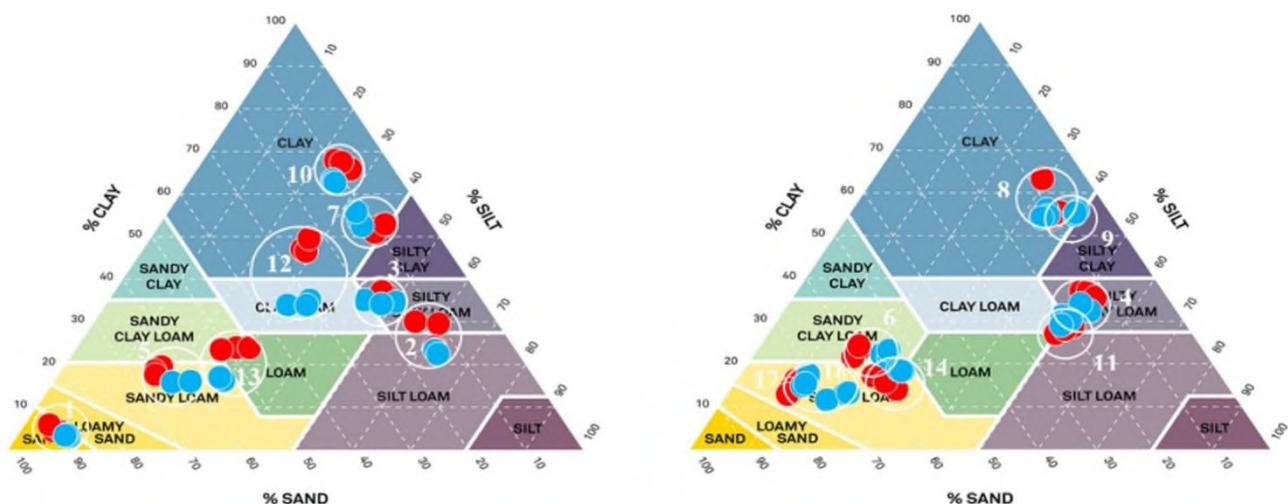


Рисунок 3. Треугольники Ферре для классификации почв (1–17) по гранулометрическому составу по результатам пипет-метода (обозначено красным цветом) и методом ISP+ (голубым цветом).

Величины коэффициентов корреляции между результатами определений содержания гранулометрических фракций пипет-методом и ISP+ составили 0,95; 0,88; 0,84; 0,97 для крупной, средней, тонкой пыли и глины, соответственно, что указывает на тесную связь между ними ($p < 0,05$). Результаты определений фракции мелкого песка расчетным методом и мокрым просеиванием также тесно коррелировали друг с другом (0,98; $p < 0,05$). Проведённая оценка разности средних для результатов определений фракций мелкого песка, тонкой пыли и глины показала отсутствие значимых расхождений между методами ($p < 0,05$). Для крупной и средней пыли такая оценка показала значимые различия (табл. 3).

Таблица 3

Оценка разности средних

Фракции	Размер частиц (мкм)	ν	d	s_d	t	$t_{0,05}$
Мелкий песок	50–250	16	-0,10	1,02	-0,10	2,12
Крупная пыль	20–50	16	-6,59	0,73	-9,05	
Средняя пыль	5–20		3,84	0,95	4,05	
Тонкая пыль	2–5		0,88	0,55	1,58	
Пыль	2–50	47	0,40	0,87	0,46	2,01
Глина	< 2	16	1,98	0,94	2,10	2,12

Примечание.

ν – число степеней свободы; d – разность средних; s_d – ошибка разности средних; t – критерий Стьюдента; $t_{0,05}$ – критические значения критерия Стьюдента при уровне значимости 0,05.

ОБСУЖДЕНИЕ

Использование измерительной системы PARIO, в работе которой применили расширенный метод интегрального давления суспензии (ISP+), имело как ряд преимуществ перед пипет-методом, так и недостатки. К преимуществам, в первую очередь, относится то, что метод ISP+ является полуавтоматическим, непрерывным и основан на моделировании процессов (Durner, Iden, 2021). При использовании системы PARIO отсутствует механическое вмешательство в процесс осаждения и значительно сокращается время, затрачиваемое на проведение анализа (~ 2,5 часа), не нужно следить за точностью глубины и времени отборов проб, имеется автоматический контроль температуры, колебания которой не должны превышать 1,5°C. Программное обеспечение PARIO Control даёт расширенные возможности для визуализации полученных данных: графики, таблицы и др. К недостаткам можно отнести большее количество массы образца, требующегося для проведения анализа по сравнению с пипет-методом, необходимость использования стеклянной посуды и ряда дополнительных манипуляций при определении песчаных и илистой фракций методом ISP+. Что касается материальных затрат, то пипет-метод остаётся самым малозатратным.

Колебание температуры почвенной суспензии является одним из ключевых факторов, оказывающих влияние на точность результатов, получаемых пипет-методом из-за изменения скоростей осаждения частиц (Вадюнина, Корчагина, 1986). При выполнении анализа с помощью измерительной системы PARIO нужно исключить термическое влияние на точность показаний давления, поэтому рекомендуется перед началом анализа уравновесить температуру между PARIO и почвенной суспензией и работать в помещении с постоянной температурой (Durner, Iden, 2021). Другим важным фактором, способным оказать влияние на работу датчика давления системы PARIO, является образование газовых пузырьков в почвенной суспензии. На точность результатов анализов методом ISP+ также влияет точность определений песчаных фракций, сухой массы образца, диспергирующего агента, плотности твёрдой фазы (Durner et al., 2017).

Возникновение систематических ошибок при определении содержания почвенных гранулометрических фракций методами седиментометрии может быть обусловлено принятыми допущениями о сферической форме частиц для использования уравнения Стокса, связующего их радиус и скорость оседания в жидкости, отсутствием турбулентных явлений в воде и взаимодействий между частицами, одинаковой плотностью (Кулижский и др., 2010). Оценка воспроизводимости результатов повторных определений содержания фракций глины, крупной и средней пыли пипет-методом и ISP+ позволяет считать их удовлетворительными. В ранее опубликованной работе (Durner, Iden, 2021) показана высокая воспроизводимость результатов определений методом ISP+. Большой разброс значений повторных определений во фракции тонкой пыли при использовании обоих сравниваемых методов можно объяснить как перечисленными выше причинами, так и обеднением образцов дерново-подбура (1,58%), чернозема глинисто-иллювиального (4,24%), каштановой почвы (5,01%), краснозема (0,05%), солончака (1,46 и 0,03%) фракцией тонкой пыли. Для фракций крупного и среднего песка большой разброс значений повторных определений при анализе чернозема глинисто-иллювиального также может быть объяснен малым их содержанием в образцах ($\leq 1\%$). Следует отметить, что ошибки просеивания при определении песчаных фракций будут линейно распространяться в сторону более мелких фракций при использовании метода ISP+ (Durner et al., 2017) и на расчётную фракцию при анализе пипет-методом.

О возможных расхождениях между результатами определений фракции средней пыли при анализе образцов тяжело суглинистых почв пипет-методом и ISP+ говорилось в работе В. Дюрнера и С.К. Иден (Durner, Iden, 2021). Несмотря на то, что оценка значимости различий средних для крупной и средней пыли показала существенные расхождения между сравниваемыми методами, такая оценка для фракций пыли, включающей частицы размером от 2 до 50 мкм, существенных различий не показала (табл. 3). Поэтому, несмотря на значимые расхождения в содержании фракций крупной и средней пыли при определении пипет-методом и ISP+, большинство исследуемых почв по гранулометрическому составу получили одинаковую классификационную принадлежность.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сравнение результатов определения гранулометрического состава разных типов почв пипет-методом и расширенным методом определения интегрального давления суспензии (ISP+) с использованием измерительной системы почвенных частиц PARIO позволяет сделать заключение о том, что каждый из методов обладает определёнными преимуществами и недостатками. Определение степени расхождения результатов повторных определений показало различную вариабельность для разных фракций при использовании обоих методов. При сравнении результатов пипет-метода и ISP+, полученных на образцах различных типов почв, установлена существенная разница в содержании фракций крупной и средней пыли; для фракций тонкой пыли и глины оба метода дали сходные результаты.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны научным сотрудникам Института физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН д-ру геол.-минерал. наук Т.В. Алексеевой, канд. геол. наук О.Г. Заниной, канд. биол. наук Д.В. Сапронову, канд. геол.-минерал. наук П.И. Калинину, канд. биол. наук Д.А. Хорошаеву за предоставление почвенных образцов; д-ру биол. наук Е.Ю. Милановскому и д-ру биол. наук В.М. Семенову за критические замечания и предложения при подготовке статьи к публикации.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

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).

ЛИТЕРАТУРА

Богатырев Л.Г., Маслов М.Н., Бенедиктова А.И., Макаров М.И. Оценка почв и земель (основные показатели и критерии) / Науч. ред. Г.С. Куст. Москва: МАКС Пресс, 2017. 192 с.

Болдырева В.Э., Безуглова О.С., Морозов И.В. К вопросу об определении гранулометрического состава почв с использованием метода лазерной дифракции // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. 2019. № 1 (33). С. 184–194. <https://doi.org/10.31774/2222-1816-2019-1-184-194>

Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А. Методы исследования физических свойств почв. Москва: Агропромиздат, 1986. 416 с.

ГОСТ 12536-2014. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава. Москва: Стандартинформ, 2011. 19 с.

ГОСТ 26423-85. Почвы. Методы определения удельной электрической проводимости, рН и плотного остатка водной вытяжки. Москва: Стандартинформ. 2011. 7 с.

Классификация и диагностика почв России / Авторы и составители: Л.Л. Шишов, В.Д. Тонконогов, И.И. Лебедева, М.И. Герасимова. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.

Кулижский С.П., Коронатова Н.Г., Артымук С.Ю., Соколов Д.А., Новокрещенных Т.А. Сравнение методов седиментометрии и лазерной дифрактометрии при определении гранулометрического состава почв естественных и техногенных ландшафтов // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2010. № 4 (12). С. 21–31.

Руководство по описанию почв. Четвертое издание, исправленное и дополненное. Рим: Продовольственная и сельскохозяйственная организация объединенных наций (ФАО), 2012. 101 с.

Теории и методы физики почв / Под ред. Е.В. Шеина, Л.О. Карпачевского. Москва: «Гриф и К», 2007. 616 с.

Теория и практика химического анализа почв / Под ред. Л.А. Воробьевой Москва: ГЕОС, 2006. 400 с.

Федотов Г.Н., Шейн В.Е., Путляев В.И., Архангельская Т.А., Елисеев А.В., Милановский Е.Ю. Физико-химические основы различий седиментометрического и лазерно-дифракционного методов определения гранулометрического состава почв // Почвоведение. 2007. № 3. С. 310–317.

Юдина А.В., Фомин Д.С., Котельникова А.Д., Милановский Е.Ю. От понятия элементарной почвенной частицы к гранулометрическому и микроагрегатному анализам (обзор) // Почвоведение. 2018. № 11. С. 1340–1362. <https://doi.org/10.1134/S0032180X18110096>

Юдина А.В., Фомин Д.С., Валдес-Коровкина И.А., Чурилина Н.А., Александрова М.С., Головлева Ю.А., Филиппов Р.В., Ковда И.В., А. А. Дымов А.А., Е. Ю. Милановский Е.Ю. Пути создания классификации почв по гранулометрическому составу на основе метода лазерной дифракции // Почвоведение. 2020. № 11. С. 1353–1371. <https://doi.org/10.31857/S0032180X20110143>

Buurman P., Pape Th., Muggler C.C. Laser grain-size determination in soil genetic studies 1. Practical problems // Soil Science. 1997. Vol. 162. No. 3. P. 211–218.

Durner W., Iden S.C., von Unold G. The integral suspension pressure method (ISP) for precise particle-size analysis by gravitational sedimentation // Water Resources Research. 2017. Vol. 53. No. 1. P. 33–48. <https://doi.org/10.1002/2016WR019830>

Durner W., Iden S.C. The improved integral suspension pressure method (ISP+) for precise particle size analysis of soil and sedimentary materials // Soil and Tillage Research. 2021. Vol. 213. P. 105086. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105086>

ISO 11277:2020. Soil quality – Determination of particle size distribution in mineral soil material – Method by sieving and sedimentation. International Standard published [60.60], 2020. Edition 3. 38 p.

ISO 13320:2020. Particle size analysis – Laser diffraction methods. International Standard published [60.60], 2020. Edition 2. 59 p.

PARIO Manual [Electronic resource]. URL: https://library.metergroup.com/Manuals/20780_PARIO_Manual_Web.pdf (accessed on 01.09.2023).

Shein E.V., Milanovskii E.Yu., Molov A.Z. The effect of organic matter on the difference between particle-size distribution data obtained by the sedimentometric and laser diffraction methods // Eurasian Soil Science. 2006. Vol. 39. No. Suppl. 1. P. S84–S90. <https://doi.org/10.1134/S106422930613014X>

Soil Survey Field and Laboratory Methods Manual. Soil Survey Investigations Report No. 51, Version 2.0 / R. Burt and Soil Survey Staff (ed.). USDA-Natural Resources Conservation Service. 2014.

Keys to Soil Taxonomy, 12th edition. Soil Survey Staff. USDA-Natural Resources Conservation Service. 2014.

Поступила в редакцию 27.03.2024

Принята 10.07.2024

Опубликована 10.07.2024

Сведения об авторах:

Ходжаева Анна Каримовна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник отдела криологии почв Института физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН – обособленного подразделения ФГБУН «Федеральный исследовательский центр «Пушкинский научный центр биологических исследований РАН», (г. Пушкино, Россия); khodzhaeva@pbcra.ru

Масликова Светлана Васильевна – бакалавр кафедры экологии и земельных ресурсов медико-биологического факультета ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет» (г. Воронеж, Россия); sveta.maslikova.01@mail.ru

Горбунова Надежда Сергеевна – кандидат биологических наук, доцент кафедры экологии и земельных ресурсов медико-биологического факультета ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет» (г. Воронеж, Россия); vilian@list.ru

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.



Статья доступна по лицензии [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Comparative assessment of gravitational sedimentation methods for the evaluation of particle-size distribution in soils

© 2024 A. K. Khodzhaeva ¹, S. V. Maslikova ², N. S. Gorbunova ²

¹Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science of the Russian Academy of Sciences, Institutskaya Street, 2, Pushchino, Moscow region, Russia. E-mail: khodzhaeva@pbcra.ru

²Voronezh State University, University Square, 1, Voronezh, Russia. E-mail: sveta.maslikova.01@mail.ru

The aim of the study was to carry out a comparative analysis of the results by determining of the particle-size distribution in different soil types by the 1) pipette method and 2) measurement device PARIO, using Integral Suspension Pressure plus method (ISP+).

Location and time of the study. The study was performed in the Core Research Facility "Physico-chemical Methods of Soil and Ecosystem Research" and in the Department of Soil Cryology of the Institute of Physical-Chemical and Biological Problems of Soil Science the Russian Academy of Sciences.

Methods. The determination of the particle-size distribution in soils was carried out by the pipette method and ISP+. Statistical processing of the analytical data was performed by Microsoft Excel and Statistica 12.

Results. The determination of the degree of discrepancy between the results of repeated determinations of the particle-size distribution in soils obtained by the pipette method and ISP+ showed that the coefficients of variation (CV) were different for different fractions. High reproducibility of the results was obtained for the clay fraction. For fractions of the coarse and middle silt, the CV values did not exceed 10-20%. The largest variation in the between repeated measurements using both methods was obtained for the fine silt fraction. The assessment of the average difference and its significance for fine silt and clay fractions by the pipette method and ISP+ showed that there were no significant discrepancies. For the coarse and middle silt, such assessment showed significant differences. Most of the studied soils (14 out of 17) obtained the same classification according to the determinations of the soil particle-size distribution by the compared methods.

Conclusions. The use of the PARIO measurement device for determining soil particle-size distribution allows to exclude disturbance of the suspension during the test run, to track the time and depth of sampling and to reduce measurement time significantly. This study showed the importance of taking into consideration the method of soil granulometry assessment, as results may be quite different, especially for the fractions of coarse and medium silt, thus affecting soil taxonomic attribution.

Keywords: soil particle-size distribution; pipette method; Integral Suspension Pressure plus method (ISP+); PARIO measurement device.

How to cite: Khodzhaeva A.K., Maslikova S.V., Gorbunova N.S. Comparative evaluation of gravitational sedimentation methods for particle-size distribution in soils. *The Journal of Soils and Environment*. 2024. 7(2). e260. DOI: [10.31251/pos.v7i2.260](https://doi.org/10.31251/pos.v7i2.260). (in Russian with English abstract).

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors are grateful to the researchers of the Institute of Physicochemical and Biological Problems of Soil Science of the Russian Academy of Sciences, Dr. of Geological and Mineralogical Sciences T.V. Alekseeva, Candidate of Geographical Sciences O.G. Zanina, Candidate of Biological Sciences D.V. Saprionov, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences P.I. Kalinin, Candidate of Biological Sciences D.A. Khoroshaev for providing soil samples; Dr. of Biological Sciences E.Y. Milanovsky and Dr. of Biological Sciences V.M. Semenov for their critical comments and suggestions in preparing the article for publication.

FUNDING

The study was carried out as part of the innovative project of national importance "Development of a system for terrestrial 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).

REFERENCES

- Bogatyrev L.G., Maslov M.N., Benediktova A.I., Makarov M.I. Assessment of soils and lands (main indicators and criteria) / G.S. Kust (ed.). Moscow: MAKS Press, 2017. 192 p. (in Russian).
- Boldyreva V. E., Bezuglova O. S., Morozov I. V. On the question on determination of particle-size distribution of soil using the laser diffraction method. *Scientific Journal of Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems*. 2019. No. 1 (33). P. 184–194. (in Russian). <https://doi.org/10.31774/2222-1816-2019-1-184-194>
- Vadyunina A.F., Korchagina Z.A. Methods of research of physical properties of soils. Moscow: Agropromizdat, 1986. 416 p. (in Russian).
- GOST 12536-2014. Soils. Methods of laboratory granulometric (grain-size) and microaggregate distribution. Moscow: Standardinform, 2011. 19 p. (in Russian).
- GOST 26423-85. Soils. Methods for determination of specific electric conductivity, pH and solid residue of water extract. Moscow: Standardinform, 2011. 19 p. (in Russian).
- Classification and diagnostics of soils in Russian / Authors and compilers: L.L. Shishov, V.D. Tonkonogov, I.I. Lebedeva, M.I. Gerasimova. Smolensk: Oykumena Publ., 2004. 342 p. (in Russian).
- Kulizhskiy S.P., Koronatova N.G., Artymuk S.Yu., Sokolov D.A., Novokreshchennykh T.A. Comparison of the sedimentation method and the laser-diffraction analysis during determination of soil texture of natural and technogenic landscapes. *Bulletin of Tomsk State University. Biology*. 2010. No. 4 (12). P. 21–31. (in Russian).
- Guidelines for soil description. Fourth edition, revised and expanded. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2012. 101 p. (in Russian).
- Theory and practice of the physics of soils / E.V. Shein, L.O. Karpachevsky (ed.). Moscow: "Grif and K", 2007. 616 p. (in Russian).
- Theory and practice of the chemical analysis of soils / L.A. Vorob'eva (ed.). Moscow: GEOS, 2006. 400 p. (in Russian).
- Fedotov G.N., Shein E.V., Arkhangel'skaya T.A., Milanovskii E.Yu., Putlyaev V.I., Eliseev A.V. Physicochemical bases of differences between the sedimentometric and laser-diffraction techniques of soil particle-size analysis. *Eurasian Soil Science*. 2007. Vol. 40. No. 3. P. 281–288. <https://doi.org/10.1134/S1064229307030064>
- Yudina A. V., Fomin D. S., Kotelnikova A. D., Milanovskii E. Yu. From the notion of elementary soil particle to the particle-size and microaggregate-size distribution analyses: a review. *Eurasian Soil Science*. 2018. Vol. 51. No. 11. P. 1326–1347. <https://doi.org/10.1134/S1064229318110091>
- Yudina A. V., Fomin D. S., Valdes-Korovkin I. A., Churilin N. A., Kovda I. V., Milanovskiy E. Y., Aleksandrova M. S., Golovleva Y. A., Phillipov N. V., Dymov A. A. The ways to develop soil textural classification for laser diffraction method. *Eurasian Soil Science*. 2020. Vol. 53. No. 11. P. 1579–1595. <https://doi.org/10.1134/S1064229320110149>

Buurman P., Pape Th., Muggler C.C. Laser grain-size determination in soil genetic studies 1. Practical problems. Soil Science. 1997. Vol. 162. No. 3. P. 211–218.

Durner W., Iden S.C., von Unold G. The integral suspension pressure method (ISP) for precise particle-size analysis by gravitational sedimentation. Water Resources Research. 2017. Vol. 53. No. 1. P. 33–48. <https://doi.org/10.1002/2016WR019830>

Durner W., Iden S.C. The improved integral suspension pressure method (ISP+) for precise particle size analysis of soil and sedimentary materials. Soil and Tillage Research. 2021. Vol. 213. P. 105086. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105086>

ISO 11277:2020. Soil quality – Determination of particle size distribution in mineral soil material – Method by sieving and sedimentation. International Standard published [60.60], 2020. Edition 3. 38 p.

ISO 13320:2020. Particle size analysis – Laser diffraction methods. International Standard published [60.60], 2020. Edition 2. 59 p.

PARIO Manual [Electronic resource]. URL: https://library.metergroup.com/Manuals/20780_PARIO_Manual_Web.pdf (accessed on 01.09.2023).

Shein E.V., Milanovskii E.Yu., Molov A.Z. The effect of organic matter on the difference between particle-size distribution data obtained by the sedimentometric and laser diffraction methods // Eurasian Soil Science. 2006. Vol. 39. No. Suppl. 1. P. S84–S90. <https://doi.org/10.1134/S106422930613014X>

Soil Survey Field and Laboratory Methods Manual. Soil Survey Investigations Report No. 51, Version 2.0 / R. Burt and Soil Survey Staff (ed.). USDA-Natural Resources Conservation Service. 2014.

Keys to Soil Taxonomy, 12th edition. Soil Survey Staff. USDA-Natural Resources Conservation Service. 2014.

Received 27 March 2024

Accepted 10 July 2024

Published 10 July 2024

About the authors:

Anna K. Khodzhaeva – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher of the Soil Cryology Department in the Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science of the Russian Academy of Sciences (Pushchino, Russia); khodzhaeva@pbcra.ru

Svetlana V. Maslikova – Bachelor of the Department of Ecology and Land Resources, Faculty of Medicine and Biology, Voronezh State University (Voronezh, Russia); sveta.maslikova.01@mail.ru

Nadezhda S. Gorbunova – Candidate of Biological Sciences, docent, Department of Ecology and Land Resources, Faculty of Medicine and Biology, Voronezh State University (Voronezh, Russia); vilian@list.ru

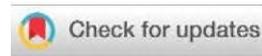
The authors read and approved the final manuscript



The article is available under [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

УДК631.618

<https://doi.org/10.31251/pos.v7i2.259>



Оценка факторов, определяющих скорость и направленность развития растительных сообществ на отвалах отходов добычи угля (на примере Горловского антрацитового месторождения)

© 2024 А. Е. Скотарева^{1,2}, Н. А. Иванов¹, Д. А. Соколов² 

¹Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, ул. Пирогова, 1, г. Новосибирск, 630090, Россия. E-mail: skotareva04@mail.ru

²ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, проспект Академика Лаврентьева, 8/2, г. Новосибирск, 630090, Россия. E-mail: sokolovdenis@issa-siberia.ru

Цель исследования. Выявление и оценка специфики сукцессионных процессов самозарастающих отвалов Горловского антрацитового месторождения в зависимости от абиотических факторов.

Место и время проведения. Внешний породный отвал Горловского антрацитового месторождения (54.568880, 83.588956), Новосибирская область, Искитимский район, июнь 2023 г.

Методы. Свойства субстратов техногенных ландшафтов определялись традиционными почвенными методами (ГОСТ 12536–2014, ГОСТ 26423–85, ГОСТ 26213–21). В полевых условиях пенетрометром измеряли твердость почв, затем по этим значениям при помощи функции зависимости рассчитывали ее плотность. Содержание общего углерода и азота определяли при помощи CHNS/O-анализатора 2400 Series II PerkinElmer. Статистическая обработка полученных данных проведена при помощи кластерного анализа (метод Варда), анализа главных компонент, а также корреляционного анализа.

Основные результаты. В отвалах отходов добычи антрацита в условиях лесостепи Западной Сибири высокое содержание физической глины и пород, продуцирующих ее в почвах, способствует развитию травянистых растительных группировок. На склоновых участках с высоким содержанием камней преимущество получает древесная растительность.

Ключевые слова: рекультивация; эмбриоземы; фитоценозы техногенных ландшафтов; отвалы отходов угледобычи.

Цитирование: Скотарева А.Е., Иванов Н.А., Соколов Д.А. Оценка факторов, определяющих скорость и направленность развития растительных сообществ на отвалах отходов добычи угля (на примере Горловского антрацитового месторождения) // Почвы и окружающая среда. 2024. Том 7. № 2. e259. DOI: [10.31251/pos.v7i2.259](https://doi.org/10.31251/pos.v7i2.259).

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время функционирование и состояние наземных экосистем в промышленных регионах претерпевают значительные изменения, связанные с увеличением интенсивности антропогенного воздействия. Не исключением является и Новосибирская область, где увеличение объемов добычи антрацитовых углей влечет за собой нарушение хода естественных природных процессов. Как правило, добыча угля и размещение ее отходов имеет разрушительные последствия для экосистем: от обеднения сообществ и смены доминантов до полного их исчезновения.

Восстановление экосистем вместе с улучшением экологической обстановки достигается в процессе формирования устойчивых растительных сообществ. Имеющиеся сегодня научные представления говорят о том, что восстановление растительного покрова сингенетично связано с формированием почв нарушенных угледобычей земель (Курачев и др., 1994). Изменения в составе растительных сообществ и свойств почв техногенных ландшафтов характеризуют протекание одного из ключевых процессов регенерационных экосистем, а именно - сукцессии. Другими словами, смена сукцессионных рядов сопровождается трансформацией почв: их химических, физических и микробиологических свойств.

Скорость и направленность сукцессий в условиях техногенных ландшафтов определяются, в первую очередь, физическими свойствами почв. Физические свойства почв отвалов неоднородны, что приводит к дифференциации условий произрастания растительности (Sokolov et al., 2021). Плотность, гранулометрический и фракционный состав субстратов обуславливают скорость и направленность развития фитоценозов, а особенности формирования корневых систем определяют характер процессов выветривания и освоения внутрпочвенного пространства (Кусов, 2007).

Процесс зарастания породных отвалов отличается линейной тенденцией увеличения процента проективного покрытия и биомассы растительности. На первых этапах в ходе сукцессий

растительности образуются «биологические корки», состоящие из мха, лишайников и других организмов, которые тесно интегрированы с частицами поверхностного слоя почвы. Поэтому ранние стадии сукцессии характеризуются преобладанием однолетних травянистых видов, что обусловливается их приспособленностью к экстремальным условиям окружающей среды голый поверхности (высокий уровень инсоляции, каменистая структура почвы и т.д.) и низкому плодородию почв (Lei et al., 2015). Свойства верхней части почв и их положение в рельефе также оказывают влияние на растительный покров. Например, на южных склоновых участках, отличающихся высоким содержанием крупнообломочных и углеродсодержащих пород, при нагреве поверхности солнцем замечена тенденция подавления роста растений (Liu et al., 2016).

Сингенетический подход в изучении специфики протекания сукцессий растительности техногенных ландшафтов заключается в комбинированной системе оценки состояния растительного покрова в совокупности с изучением особенностей физического и химического состава почв. Все это при помощи корреляционного анализа позволяет выявить положительные и отрицательные связи между показателями состояния и особенностями молодых фитоценозов отвалов (процент проективного покрытия, число видов), с одной стороны, и спецификой свойств почв, с другой.

Таким образом, целью исследования является выявление и оценка специфики сукцессионных процессов самозарастающих отвалов Горловского антрацитового месторождения в зависимости от абиотических факторов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объектов исследований был выбран ряд участков внешнего породного отвала Горловского антрацитового месторождения (54.568880 с.ш., 83.588956 в.д.), расположенного в Искитимском районе Новосибирской области. Биологическая рекультивация на отвале не проводилась, поэтому на всех участках исследований восстановление растительных сообществ происходит при самозарастании. Описание растительных сообществ и сбор характерных представителей для дальнейшей гербаризации, а также исследование почв проводили в июне 2023 г. Участки выбирали по ходу рекогносцировочных маршрутов по периметру участков 2–3 летней отсыпки с тем расчетом, чтобы охватить как можно больше местообитаний, дифференцированных по различиям в рельефе, экспозиции склонов, возрасте, особенностях почвообразующих пород и характере зарастания (табл. 1). Детальные геоботанические описания проведены на восьми выбранных репрезентативных участках. Площадь участков равна 100 м². Также в работе использовали материалы, полученные ранее по результатам аналогичных исследований (Restoration of the biodiversity..., 2021; Скотарева, Соколов, 2023). Сбор гербарных образцов производили по всему периметру выбранного для анализа отвала с целью наибольшего охвата различных факторов и условий, влияющих на развитие растительных сообществ.

На поверхности отвала сформированы эмбриоземы, относящиеся, в соответствии с классификацией почв техногенных ландшафтов (Курачев, Андроханов, 2002), к типам инициальных, органо-аккумулятивных и дерновых. Классификационная принадлежность подтипов эмбриозем определялась по характеру типодиагностических горизонтов (Androkhonov, Sokolov, 2021).

Для оценки плотности почв, как основного из показателей, характеризующих абиотические свойства, использовали пенетrometer Wile Soil (FARMCOMP, Финляндия). В полевых условиях пенетрометром измеряли твердость почв, затем по этим значениям по уравнению регрессии (Соколова и др., 2020) рассчитывали их плотность. На каждом ключевом участке закладывалось почвенные разрезы, из которых по глубинам 0-10 и 10-20 см отбирались пробы почв. Содержание в почвах мелкозема и крупнозема – скелетность (Скел.) оценивали ситовым методом; содержание тонких фракций (>0,01 мм – физической глины) определяли пипеточным методом (ГОСТ 12536-2014).

Определение pH почвенных проб проводили с помощью pH-метра (Hanna-213 в комплекте с электродом ЭСК 1060/7) с предварительной подготовкой водной суспензии почв (ГОСТ 26423-85). Определение содержания органического вещества (Сорг.) осуществляли по методу Тюрина с колориметрическим окончанием (ГОСТ 26213-21). Содержание общих углерода и азота определяли при помощи CHNS/O-анализатора 2400 Series II Perkin Elmer (США).

Выраженность рельефа (Рел.) оценивали из отношения площади поверхности к площади ее основания ($S_{\text{п}}/S_0$).

Статистическую обработку данных выполняли с использованием пакетов программ Microsoft Excel и PAST V2.17. Для статистической обработки использовались как собственные данные, так и данные Н.А. Соколовой (2023) полученные теми же методами и подходами при исследовании

аналогичных участков. Таким образом всего было исследовано 23 участка. Для группировки наиболее близких по составу растительных сообществ участков исследований степень сходства видового состава флоры оценивали при помощи кластерного анализа. Взаимосвязь свойств почв при сукцессии фитоценозов в условиях техногенных ландшафтов оценивали на основании коэффициента ранговой корреляции Спирмена. Структуру взаимосвязи изученных объектов (разных участков отвалов) и переменных анализа (свойств почв и растительных сообществ) визуализировали с помощью метода анализа главных компонент.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ

Полевые исследования показали, что развитие растительного покрова на начальных этапах контролируется абиогенными, главным образом, техногенными факторами. На более поздних этапах эволюции определяющее значение приобретают биогеоценотические свойства сообществ, что согласуется с выводами полученными О.И. Глебовой (2005) при работе с аналогичными техногенными местообитаниями Кузнецкого каменноугольного бассейна. По результатам визуальной оценки местности, составления геоботанических описаний, сбора и идентификации гербарных образцов на отвалах были выявлены разнообразные пионерные, простые и сложные растительные группировки (табл. 1).

Таблица 1

Характеристика исследуемых участков

Номер участка	Описание участка (почвообразующие породы)	Возраст, лет	Число видов растений, шт.	Фитоценоз	Тип эмбриозема (обозначение)
1	южный склон (плотные)	35–40	8	пионерный	инициальный (ЭИпион_др)
2	горизонтальный, бугристый участок (плотные)	35–40	15	простой	органо-аккумулятивный (ЭОАпр_др)
3	горизонтальный, выровненный участок (плотные)	25–30	16	простой	органо-аккумулятивный (ЭОАпр_тр)
4	горизонтальный выровненный участок (плотные)	25–30	21	сложный	дерновый (ЭДсл_тр)
5	северный склон (плотные)	35–40	5	простой	органо-аккумулятивный (ЭОАпр_др)
6	горизонтальный, бугристый участок (рыхлые)	20–25	25	сложный	дерновый (ЭДсл_тр)
7	горизонтальная поверхность, выровненный участок (плотные)	10–15	11	пионерный	инициальный (ЭИпион_тр)
8	пологий (7–10°) южный склон, выровненный участок (плотные)	20–25	6	простой	органо-аккумулятивный (ЭОАпр_др)

Пионерные растительные группировки приурочены к молодым (до 10 лет), а также средневозрастным (10–20 лет) участкам отсыпки плотных осадочных пород. На таких участках растительный покров изреженный, представлен отдельными куртинами и ассоциациями донника желтого (*Melilotus officinalis* L.) и синяка обыкновенного (*Échium vulgáre* L.), реже клевера лугового (*Trifolium pratense* L.), что свидетельствует о начальном этапе протекания сукцессионных процессов. На горизонтальных спланированных участках отсыпки плотных осадочных пород (участок №7) общее число видов не превышает 11. Процент общего проективного покрытия низкий, составляет около 10–15%, выражена мозаичность, отмечено формирование небольших ассоциаций пионерных видов. Старые (более 20 лет) участки отсыпки, занятые пионерными группировками, представлены южными (участок №1) и западными склонами (рис. 1). Здесь, помимо вышеописанных видов, встречаются другие рудеральные виды, среди которых преобладают икотник серый (*Bertéro aincána* L.) и желтушник левкойный (*Erýsimum cheiranthoïdes* L.). Кроме того, пионерные растительные группировки встречаются также на молодых и средневозрастных (10–20 лет) горизонтальных участках с бугристым рельефом. Их отличительной особенностью является присутствие древесных видов, таких

как береза повислая (*Betula pendula* Roth.), сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.) и осина обыкновенная (*Populus tremula* L.), которые распространены на участках, получающих дополнительное увлажнение.

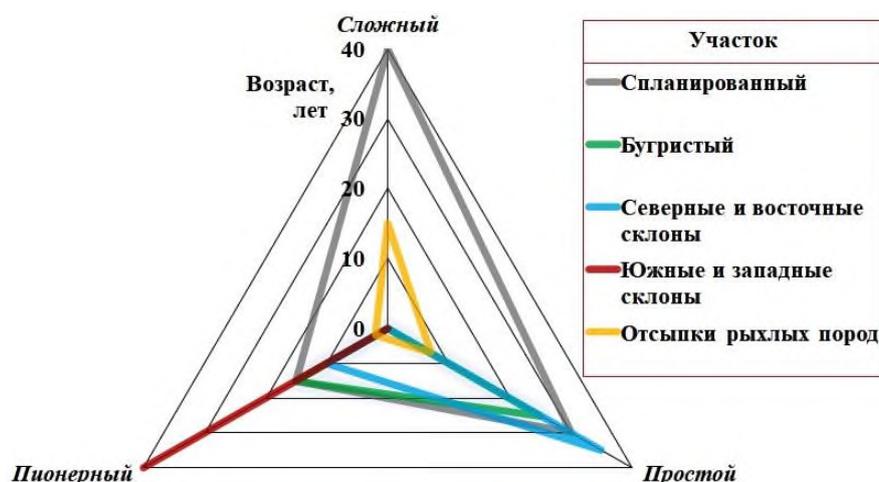


Рисунок 1. Схема сукцессий фитоценозов в техногенных экосистемах Горловского антрацитового месторождения.

Преобладающими почвами на участках с пионерной растительностью являются инициальные эмбриоземы. Типичный подтип отмечается на молодых и средневозрастных участках, криптопедогенный – на старых участках с экстремальными эдафическими условиями. Как правило, инициальные эмбриоземы сильнокаменистые по составу. Поскольку слагающие породы имеют преимущественно серый или темно-серый цвет, поверхность инициальных эмбриоземов подвержена значительным колебаниям температуры, что, в свою очередь, способствует активной дезинтеграции каменистых отдельностей с образованием мелкозем (Соколов и др., 2015). На склонах, особенно южных и западных, этот процесс более выражен; здесь образовавшийся материал перемещается вниз по склонам, в результате чего происходит обновление поверхности, что препятствует закреплению травянистой растительности.

На участках, где в почвах накапливается мелкозем, эдафические условия со временем улучшаются, способствуя, тем самым, развитию простых растительных группировок. Простые растительные группировки характеризуются одноярусностью, низким видовым разнообразием, преобладанием одного-двух видов – эдификаторов, высоким процентом проективного покрытия (Воронов, 1973; Кандрашин, 1989). Простые фитоценозы на горизонтальных спланированных участках формируются за 5–7 лет на рыхлых осадочных породах и за 15–20 лет на плотных (рис. 1). В их составе сохраняется высокая доля рудеральных видов, но преобладают донник желтый (*Melilotus officinalis* L.) и земляника зеленая (*Fragaria viridis* Duch.). Отдельными куртинами встречаются злаковые растения: ежа сборная (*Dactylis glomerata* L.) и костер ржаной (*Bromus secalinus* L.). Общее число видов (участок №3) достигает 16.

В почвах, благодаря накоплению на поверхности растительных остатков, формируются горизонты их аккумуляции; такие почвы называют органо-аккумулятивными эмбриоземами (Курачев, Андроханов, 2002). На отвалах Горловского антрацитового месторождения встречаются два подтипа этих почв. Подтип войлочных эмбриоземов формируются под травянистыми простыми растительными группировками, а подстилочный подтип под древесной растительностью (Androkhanov, Sokolov, 2021).

Простые сообщества с доминированием древесных видов характерны для склонов и средневозрастных и старых участков с бугристым рельефом. При этом на бугристых участках (участок №2) отмечено формирование березняка (*Betula pendula* Roth.) с одиночными включениями представителей осины (*Populus tremula* L.) и сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.). Сомкнутость крон около 70%. В травостое формируется сообщество с преобладанием пионерных видов: мать-и-мачехи (*Tussilago farfara* L.), донника желтого (*Melilotus officinalis* L.) и ежи сборной (*Dactylis glomerata* L.); процент общего проективного покрытия высокий и составляет 80%. В целом, общее число видов здесь достигает 15 и более. Полученные данные о качественном и количественном распределении видов в экотопе, позволяют оценить данную сукцессионную стадию как березово-сосновый лес с разнотравно-злаковым травостоем, характерную для лесостепной зоны Западной

Сибири (Кандрашин, 1989). Кроме того, на таких участках выражен напочвенный ярус, представленный моховым покровом, являющимся идентификационным признаком зоны прикромного повышенного увлажнения (Уфимцев, 2023).

Простые древесные группировки склоновых участков отличаются более низким количеством видов (табл. 1). Здесь, по причине описанного выше обновления поверхности и провальной водопроницаемости, на начальных этапах формирования растительного покрова древесные виды получают преимущество перед травянистыми (Frouz et al., 2018). Впоследствии закреплению травянистых видов, препятствует изменение светового режима поверхности при смыкании крон деревьев. Поэтому на обследованных нами участках №5 и №7 травянистый ярус практически не развит.

Формирование на отвалах сложных растительных группировок (участки №4 и №6) характеризуется увеличением количества видов (20 и более) и рассредоточением их в пространстве; также отмечается дифференцированность по ярусам (Воронов, 1973). Процент проективного покрытия находится в интервале 80–100%. В составе таких сообществ преобладают злаки, такие как ежа сборная (*Dactylis glomerata* L.), мятлик узколистый (*Poa angustifolia* L.) и костер ржаной (*Bromus secalinus* L.). На исследуемых отвалах образование сложных фитоценозов наблюдается на участках отсыпки плотных пород на старых (более 20 лет) горизонтальных выровненных поверхностях, на рыхлых почвообразующих породах и на участках с бугристым рельефом. В формирующемся фитоценозе с корневищными или корнеотпрысковыми растениями с мощной корневой системой более активно происходит освоение внутрипочвенного пространства (Батурина, 2005). В результате этого под сложными растительными группировками формируются дерновые эмбриоземы, относящиеся к мезофитному подтипу.

Таким образом, дифференциация растительных сообществ на отвалах отходов добычи антрацита, в целом, соответствует природным закономерностям, характерным для лесостепной зоны Западной Сибири. Так, на плакорных выровненных участках и пологих склонах южной экспозиции отмечается преобладание травянистой растительности. В нижней части теневых склонов, а также на участках с микро- и макропонижениями, бугристыми формами рельефа выявлено доминирование древесной растительности (Лапшина, 1978). Подтверждением этого служат результаты группировки растительных сообществ исследуемых ключевых участков, которые были получены при проведении кластерного анализа. Кластеризация разделила их на две группы по типу доминирующей растительности: древесной или травянистой (рис. 2). Простые группировки лесных фитоценозов вошли в первую группу, где выделяется более богатый по видовому составу участок №2. Вторая группа объединила участки с пионерными, простыми и сложными травянистыми фитоценозами. В этой группе отмечается наиболее богатый по видовому разнообразию участок №6. В отдельную подгруппу были включены участки пионерных сообществ (№ 1 и №7). Третья подгруппа объединила отличающиеся простые и сложные фитоценозы участков №3 и №4.

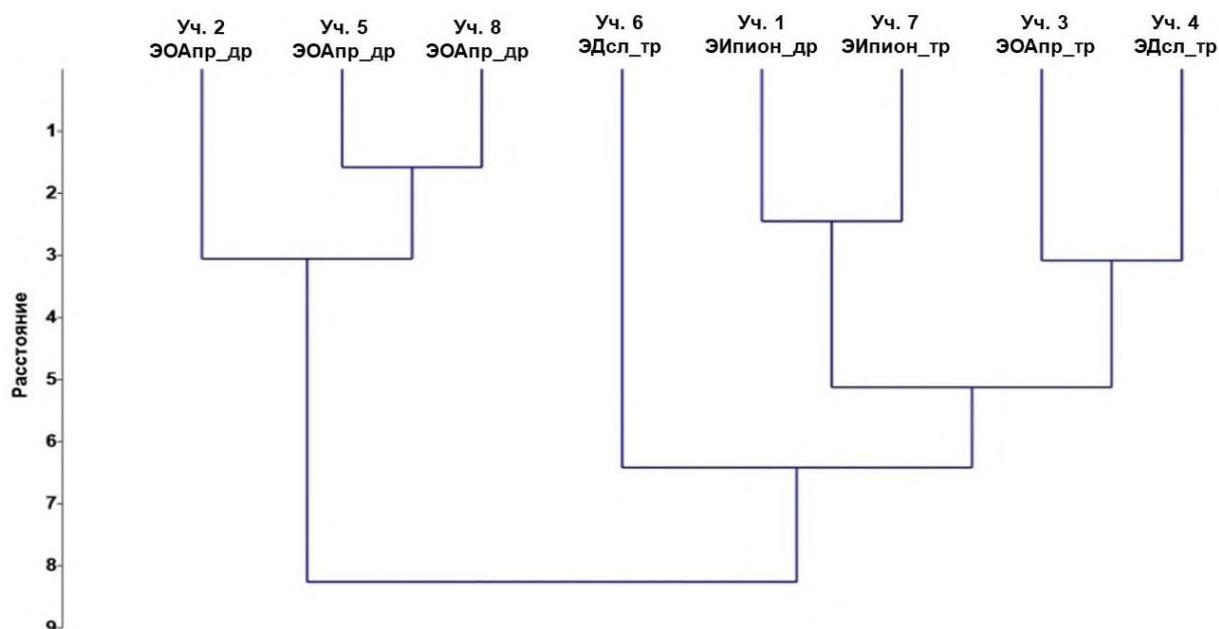


Рисунок 2. Дендрограмма иерархической группировки участков исследований (метод Варда).

Характерной особенностью почв исследуемого отвала Горловского антрацитового месторождения является неоднородность поверхности, которая проявляется в рельефе, слагающих породах, возрасте и т.д. Отмеченные особенности сказываются на свойствах почв, определяя, тем самым, дифференцированность эдафических условий формирования растительного покрова (табл. 2).

Таблица 2

Основные физические свойства почв исследуемых отвалов*

Описание почв участков	Глубина, см	Плотность, г/см ³	Доля фракции, %	
			>3 мм	<0,01 мм
Рельеф				
Склоновый (n=6)	0–10	1,3–2,0	43,1–75,9	8,1–26,7
	10–20		71,2–86,9	9,1–24,1
Бугристый (n=5)	0–10	1,4–1,7	36,3–81,1	0,1–23,9
	10–20		63,3–80,1	0,4–32,8
Спланированный (n=12)	0–10	1,8–2,1	0,4–46,5	10,6–36,1
	10–20		0,2–57,5	13,9–32,4
Почвообразующие породы				
Плотные (n=18)	0–10	1,4–2,4	32,6–75,9	8,1–36,1
	10–20		55,0–86,9	9,1–2,8
Рыхлые (n=5)	0–10	1,2–1,4	0,0–0,4	32,8–59,1
	10–20		0,0–0,2	31,1–65,0
Возраст				
Молодые, до 10 лет (n=5)	0–10	1,7–2,4	30,1–89,1	1,5–2,4
	10–20		64,4–90,1	1,9–2,1
Средневозрастные, 10-20 лет (n=7)	0–10	1,4–2,2	20,8–40,7	4,4–36,1
	10–20		32,5–57,5	4,1–32,4
Старые, более 20 лет (n=11)	0–10	1,2–1,8	0,4–75,9	8,1–32,8
	10–20		0,2–86,9	9,1–32,8
Тип эмбриозема				
Инициальные (n=8)	0–10	1,4–2,4	40,7–74,1	8,1–36,1
	10–20		57,5–86,9	9,1–32,4
Органо-аккумулятивные (n=10)	0–10	1,2–2,1	36,3–75,9	10,6–26,7
	10–20		56,1–73,0	13,9–32,8
Дерновые (n=5)	0–10	1,3–2,1	0,4–32,6	25,5–59,1
	10–20		0,2–55,0	19,5–65,0

Примечание.

*Для характеристики диапазонов значений использовались как собственные, так и данные Н.А. Соколовой (2023).

Результаты исследования основных физических свойств почв, представленные в таблице 2, говорят о высокой каменистости почв и, соответственно, низком содержании физической глины. Максимальная каменистость (40,7–86,9%) наблюдается в инициальных эмбриоземах, так как крупные обломки разрушаются здесь только под действием физического выветривания, тогда как участки с дерновыми эмбриоземами дополнительно подвергаются процессам химического, биофизического и биохимического выветривания (Шуклина и др., 2018). Для последних характерно минимальное содержание камней (0,4–32,6%) и относительно высокая доля физической глины (25,5–32,8%).

Склоновые участки подвержены воздействию осадков и образованию стоковых серий. Поверхность участков с бугристым и склоновым рельефом имеет более низкую плотность субстрата, что обеспечивает интенсивное протекание процессов выветривания. Крупные обломки пород здесь быстрее разрушаются до мелкозема, который накапливается в понижениях, способствуя лучшему развитию растений. Каменистость почв участков с бугристым рельефом составляет 36,3–63,3% (Андроханов, Соколова, 2022). Плотность зависит от содержания в почвах камней (Госсен и др., 2016) и варьирует в широких интервалах (1,2–2,4). Минимальная плотность наблюдается в эмбриоземах, сформированных на рыхлых породах (1,2–1,3), максимальная на горизонтальных спланированных участках отсыпки плотных пород (1,8–2,4).

Физико-химические свойства почв Горловского антрацитового месторождения характеризуются нейтральным или слабощелочным показателем кислотности (табл. 3). Содержание общего углерода варьирует в диапазоне от 0,5 до 21,8% и определяется присутствием включений углистых частиц, что характерно для большинства почв отвалов угольных месторождений (Соколов, 2009). При этом содержание органического углерода существенно меньше и составляет от 0,2 до 3,8%. Содержание азота на всех исследуемых участках варьирует в пределах от 0,07 до 0,64%. Следует обратить внимание, что содержание оцениваемых показателей приведено для мелкозема почв. В тоже время если учесть каменистость почв и пересчитать значения углерода и азота на всю почву, то они в разы меньше чем в мелкоземе (табл. 3), а в максимально каменистых инициальных эмбриоземах на порядок.

Таблица 3

Основные химические свойства почв и мелкозема почв исследуемых ключевых участков

№ участка (обозначение)	Глубина, см	pH	Углерод органического вещества (Сорг.), %	Углерод общий (Собщ.), %	Азот общий (Nобщ.), %
Уч. 1 (ЭИпион_др)	0–10	8,5	1,1/0,1*	4,7/0,4	0,35/0,032
	10–20	8,4	1,2/0,1	4,4/0,2	0,33/0,015
Уч. 2 (ЭОАпр_др)	0–10	7,9	3,8/2,1	21,3/11,7	0,63/0,31
	10–20	7,9	3,1/1,0	9,9/3,2	0,44/0,11
Уч. 3 (ЭОАпр_тр)	0–10	6,7	1,7/0,6	6,0/2,2	0,50/0,24
	10–20	7,1	0,6/0,2	2,4/0,7	0,30/0,12
Уч. 4 (ЭДсл_тр)	0–10	6,6	1,6/0,9	7,0/3,8	0,45/0,28
	10–20	7,9	2,2/0,8	7,3/2,8	0,42/0,22
Уч. 5 (ЭОАпр_др)	0–10	6,7	1,7/0,3	5,7/1,0	0,36/0,09
	10–20	6,2	2,7/0,6	21,8/5,0	0,54/0,12
Уч. 6 (ЭДсл_тр)	0–10	7,2	1,4/1,4	2,7/2,7	0,24/0,23
	10–20	8,1	0,2/0,2	0,5/0,5	0,08/0,07
Уч. 7 (ЭИпион_тр)	0–10	8,0	2,2/1,0	11,0/5,3	0,61/0,31
	10–20	7,5	1,0/0,6	14,0/5,0	0,70/0,20
Уч. 8 (ЭОАпр_др)	0–10	7,2	1,5/0,6	8,4/3,5	0,45/0,24
	10–20	7,5	0,5/0,1	2,7/0,6	0,45/0,08

Примечание.

*1,1/0,1: 1,1 – содержание в мелкоземе; 0,1 – содержание в почвах.

Корреляционный анализ описываемых свойств почв показал положительную связь между скелетностью и плотностью (0,69) (табл. 4).

Таблица 4

Коэффициенты корреляции Спирмена (n=23)

Параметр	Рел.	Скел.	Пл.	ФГ	Сорг.	pH	Собщ.	Nобщ.	ЧВ
Скел.	0,04	1							
Пл.	-0,19	0,69	1						
ФГ	-0,08	-0,84	-0,52	1					
Сорг.	-0,13	-0,60	-0,64	0,58	1				
pH	-0,10	0,04	0,04	-0,004	-0,15	1			
Собщ.	-0,15	-0,48	-0,47	0,61	0,89	-0,24	1		
Nобщ.	-0,12	-0,64	-0,55	0,72	0,85	-0,03	0,88	1	
ЧВ	-0,69	-0,35	-0,26	0,32	0,31	0,10	0,18	0,21	1
ПП	-0,17	-0,53	-0,45	0,60	0,39	-0,17	0,35	0,41	0,61
	слабая корреляционная зависимость								
	средняя корреляционная зависимость								
	сильная корреляционная зависимость								

Примечание.

* Рел.– рельеф, отношение S_o/S_n , Скел. – скелетная часть почвы, Пл. – плотность почвы, ФГ – физическая глина, Сорг.–органический углерод, pH– водородный показатель, Собщ.– общий углерод, Nобщ. – общий азот, ЧВ – число видов, ПП – проективное покрытие.

Отрицательную корреляцию с содержанием крупнозема продемонстрировали значения содержания физической глины (-0,84), а также органического углерода (-0,60) и общего азота (-0,64). Принимая это во внимание, можно сделать вывод, что содержание крупнозема в почвах является важнейшим параметром, определяющим основные химические и физические свойства почвы и, как следствие, условия произрастания растений в техногенных ландшафтах.

Анализ корреляционных зависимостей показателей состояния растительных сообществ со свойствами почв продемонстрировал, что наиболее тесную отрицательную корреляцию имеет рельеф и число видов (см. табл. 4). Высокая расчлененность рельефа обуславливает доминирование древесной растительности. В травяном ярусе формирующихся на поверхности отвалов лесных сообществах по мере увеличения сомкнутости крон происходит выпадение светолюбивых растений. Наиболее выражены связи свойств почв с площадью проективного покрытия. Так, средние статистически значимые коэффициенты корреляции зафиксированы с содержанием физической глины (ФГ), долей скелетной части почв (Скел.) и числом видов (ЧВ). Слабая корреляционная зависимость проективного покрытия отмечается с плотностью и содержанием общего азота.

Результаты анализа данных методом главных компонент показали (табл. 5), что наиболее тесную положительную связь с первой главной компонентой имеет содержание в почвах органического и общего углерода, а также азота. Обратную корреляцию с первой главной компонентой демонстрируют скелетность почв и плотность. Очевидно, что чем выше содержание в почве органического вещества, и, как правило, корней, тем ниже содержание камней и, соответственно, ниже плотность. Вторая компонента также положительно связана с общим углеродом и отрицательно с числом видов и проективным покрытием, что, вероятно обусловлено накоплением подстилки в маловидовых древесных сообществах. Отмеченное обстоятельство подтверждает также третья компонента, которая коррелирует с числом видов, но имеет сильную связь со степенью расчлененности рельефа.

Таблица 5

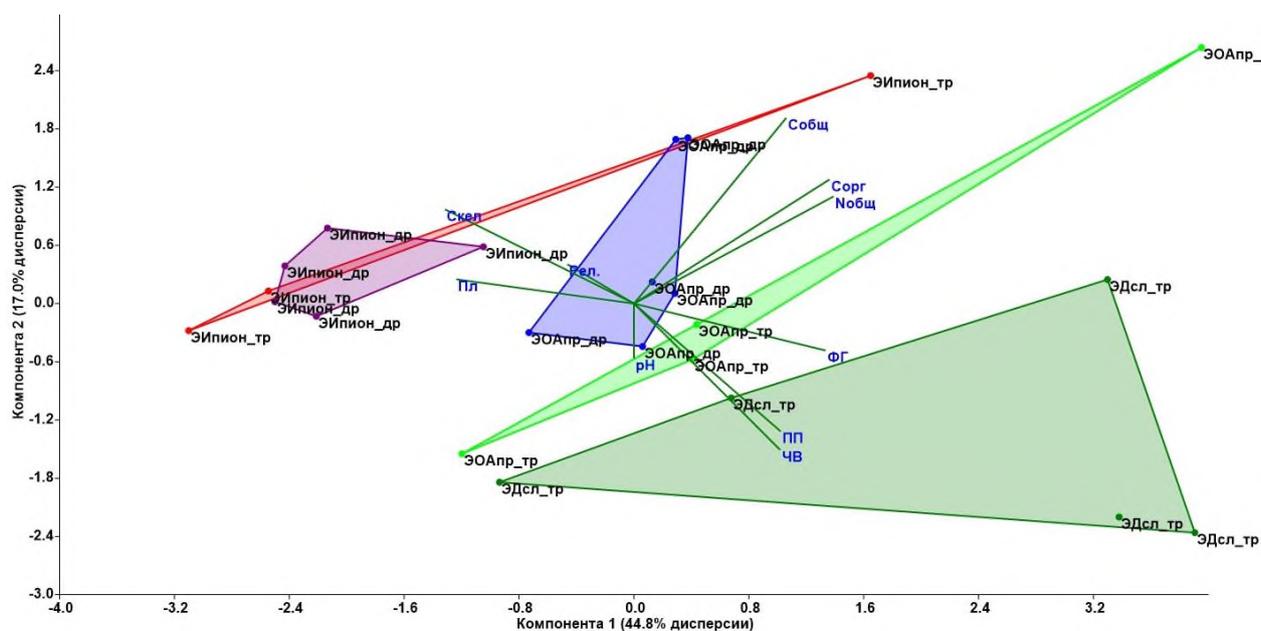
Корреляционная связь главных компонент, основных физических и химических свойств почв и некоторых параметров состояния растительного покрова

Показатель	Компонента 1 (44,8% дисперсии)	Компонента 2 (17,0% дисперсии)	Компонента 3 (14,4% дисперсии)
Расчлененность рельефа	-0,30	0,22	-0,88
Скелетность	-0,74	0,11	0,28
Плотность	-0,67	0,09	0,54
Содержание физ. глины	0,78	-0,08	-0,20
Сорг.	0,87	0,35	-0,12
pH	-0,13	-0,17	-0,02
Собщ.	0,83	0,42	-0,01
Нобщ.	0,85	0,31	-0,14
Число видов	0,55	-0,55	0,50
Проективное покрытие	0,65	-0,56	0,02

Примечание.

*Выделение жирным шрифтом означает выявление тесной положительной связи между показателями

На графике видно, что высокое содержание физической глины (ФГ) способствует развитию травянистых растительных группировок, а преобладание в почвах крупнозема (Скел.) – древесной (рис. 3). Это связано с тем, что неглубокая корневая система травянистой растительности, закрепляясь в почве, способствует биофизическому выветриванию и накоплению физической глины (Кусов, 2007). Тогда как на склоновых участках с высоким содержанием камней, на начальных этапах формирования растительного покрова преимущество получает древесная растительность, что было также отмечено для почв отвалов буроугольных месторождений Чехии (Frouz et al., 2018).



Обозначения:

- ЭИпион_др – инициальные эмбриоземы под пионерными древесными сообществами;
- ЭИпион_тр – инициальные эмбриоземы под пионерными травянистыми сообществами;
- ЭОАпр_тр – органо-аккумулятивные эмбриоземы под простыми травянистыми сообществами;
- ЭОАпр_др – органо-аккумулятивные эмбриоземы под простыми древесными сообществами;
- ЭДсл_тр – дерновые эмбриоземы под сложными травянистыми сообществами.

Рисунок 3. Расположение исследуемых участков и переменных анализа (свойства почв и растительных сообществ) в плоскости первых двух главных компонент.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенных исследований были выявлены особенности развития пионерных, простых и сложных растительных группировок на разновозрастных участках отсыпки плотных и рыхлых осадочных пород отвалов угледобычи Горловского антрацитового месторождения. Отмечено, что развитие пионерных растительных группировок происходит на молодых и средневозрастных площадках отсыпки плотных осадочных пород, характеризующихся преобладанием инициальных эмбриоземов с сильнокаменистым составом, а также на склоновых участках, где закреплению растений препятствует обновление поверхности.

Формирование простых травянистых фитоценозов происходит на горизонтальных средневозрастных и старых участках отсыпки плотных пород. Простые древесные фитоценозы формируются на участках с бугристым рельефом, а также теневых склонах; для них характерно преобладание березы повислой (*Betula pendula* Roth). В результате развития простых фитоценозов на поверхности происходит накопление растительных остатков и, как следствие, формирование органо-аккумулятивных эмбриоземов.

На старых участках отсыпки плотных пород, а также средневозрастных участках, сложенных рыхлыми породами, образуются сложные фитоценозы. Для них характерна частая встречаемость ежи сборной (*Dactylis glomerata* L.), мятлика узколистного (*Poa angustifolia* L.) и костра ржаного (*Bromus secalinus* L.). Высокий процент освоения внутрипочвенного пространства обуславливает формирование вместе со сложными фитоценозами дерновых эмбриоземов.

Результаты кластерного анализа позволили разделить репрезентативные участки на две крупные группы по доминирующему типу растительности: древесной или травянистой. Выявленные корреляционные связи между свойствами почв, площадью проективного покрытия и числом видов растений подтверждают, что на склоновых и бугристых поверхностях преимущество получают древесные сообщества, на горизонтальных выровненных участках – травянистые.

Анализ полученных данных проведенный с использованием методом главных компонент показали подтвердили предположение о том, что высокое содержание физической глины и пород ее продуцирующих способствует развитию травянистых растительных группировок; на склоновых

участках с высоким содержанием камней на начальных этапах формирования растительного покрова преимущество получает древесная растительность.

Таким образом оценив факторы, определяющие скорость и направленность развития растительных сообществ на исследуемых участках, можно предложить практические рекомендации по восстановлению отвалов отходов добычи антрацита. Так в целях формирования лесных насаждений в аналогичных техногенных ландшафтах достаточным является организация расчлененного мелкобугристого или террасированного рельефа. При этом минимизация планировки поверхности на горнотехническом этапе снижет затраты на рекультивацию. Планировка необходима в тех случаях, когда цель рекультивации состоит в формировании травянистых сообществ, обогащению видами которых и ускорению развития способствует отсыпка на поверхности рыхлых суглинистых пород.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 23-24-00116).

ЛИТЕРАТУРА

Андроханов В.А., Соколова Н.А. Почвенно-экологическое состояние поверхности отвалов антрацитовых месторождений (на примере Горловского антрацитового месторождения, Новосибирская область) // Достижения науки и техники АПК. 2022. Том 36. № 5. С. 31–36. https://doi.org/10.53859/02352451_2022-36-5-31

Батурина В.Б. Особенности гумификации и минерализации корневой массы в почвах техногенных ландшафтов. Автореферат диссертации ... канд. биол. наук. Новосибирск, 2005. 19 с.

Воронов А.Г. Геоботаника: Учеб. пособие для ун-тов и пед. ин-тов. 2-е изд. Высшая школа, 1973. 384 с.

Глебова О.И. Биогеографическая диагностика эмбриоземов Кузбасса. Автореферат диссертации ... канд. биол. наук. Новосибирск, 2005. 18 с.

Госсен И.Н., Кулижский С.П., Данилова Е.Б., Соколов Д.А. Бонитировочный подход к оценке почвенно-экологического состояния техногенных ландшафтов Сибири (на примере отвалов антрацитовых, каменно- и бурогольных месторождений) // Вестник Новосибирского государственного аграрного университета. 2016. № 2 (39). С. 71–81.

ГОСТ 26423-85. Почвы. Методы определения удельной электрической проводимости, рН и плотного остатка водной вытяжки. Москва: Издательство стандартов, 1985. 4 с.

ГОСТ 12536-2014. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава. Москва: Стандартинформ, 2015. 18 с.

ГОСТ 26213-21. Почвы. Методы определения органического вещества. Москва: Российский институт стандартизации, 2021. 7 с.

Кандрашин Е.Р. Сукцессии биоты в техногенных экосистемах (на примере Кузнецкого угольного бассейна): Автореферат диссертации ... канд. биол. наук. Днепропетровск, 1989. 17 с.

Курачев В.М., Андроханов В.А. Классификация почв техногенных ландшафтов // Сибирский экологический журнал. 2002. Том 9. № 3. С. 255–261.

Курачев В.М., Кандрашин Е.Р., Рагим-заде Ф.К. Сингенетичность растительности и почв техногенных ландшафтов: экологические аспекты, классификация // Сибирский экологический журнал. 1994. Том 1. № 3. С. 205–214.

Кусов А.В. Гранулометрическая диагностика внутрипочвенного выветривания обломочного материала в техногенных ландшафтах // Сибирский экологический журнал. 2007. Том 14. № 5. С. 837–843.

Лапшина Е.И. Растительный покров // Новосибирская область: природа и ресурсы. Новосибирск: Наука. Сибирское отделение, 1978. С. 112–124.

Скотарева А.Е., Соколов Д.А. Специфика сукцессии фитоценозов на отвалах плотных осадочных пород (например Горловского антрацитового месторождения) // Почвы и окружающая среда [Электронный ресурс]: Сборник научных трудов Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 55-летию Института почвоведения и агрохимии СО РАН (Новосибирск, 2–6 октября 2023 г.). Новосибирск: ИПА СО РАН, 2023. С. 578–583. <https://doi.org/10.31251/conf1-2023>

Соколова Н.А. Оценка почвенно-экологического состояния отвалов угольных разрезов дистанционными методами (на примере Горловского антрацитового месторождения). Диссертация ... канд. биол. наук. Томск, 2023. 200 с.

Соколова Н.А., Госсен И.Н., Соколов Д.А. Оценка пригодности вегетационных индексов для выявления почвенно-экологического состояния поверхности отвалов антрацитовых месторождений // Экология и промышленность России. 2020. Том 24. № 1. С. 62–68. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2020-1-62-68>

Соколов Д.А. Окислительно-восстановительные процессы в почвах техногенных ландшафтов. Автореферат диссертации ... канд. биол. наук. Новосибирск, 2009. 17 с.

Соколов Д.А., Мерзляков О.Э., Доможакова Е.А. Оценка литогенного потенциала гумусонакопления в почвах отвалов каменноугольных месторождений Сибири // Вестник Томского государственного университета. 2015. № 399. С. 247–253. <https://doi.org/10.17223/15617793/399/40>

Уфимцев В.И. Эндоекогенез насаждений *Pinus Sylvestris* L. на отвалах Кузбасса. Диссертация ... д-р. биол. наук. Томск, 2023. 420 с.

Шуклина А.Е., Соколова Н.А., Худяков С.Е., Госсен И.Н., Соколов Д.А. Оценка факторов дифференциации гранулометрического состава почв техногенных ландшафтов Горловского антрацитового месторождения // Почвы в биосфере: Сборник материалов Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 50-летию Института почвоведения и агрохимии СО РАН, Новосибирск, 10–14 сентября 2018 года / А.И. Сысо (отв. ред.). Часть II. Новосибирск: Национальный исследовательский Томский государственный университет, 2018. С. 353–358.

Androkhonov V.A., Sokolov D.A. Soil evolution and reclamation of technogenic landscapes in Siberia // Advances in raw material industries for sustainable development goals / V. Litvinenko (ed.). Leiden: CRC Press/Balkema, 2021. P. 268–273. <https://doi.org/10.1201/9781003164395>

Frouz J., Mudrák O., Reitschmiedová E., Walmsley A., Vachová P., Šimáčková H., Albrechtová J., Moradi J., Kučera J. Rough wave-like heaped overburden promotes establishment of woody vegetation while leveling promotes grasses during unassisted post mining site development // Journal of Environmental Management. 2018. Vol. 205. P. 50–58. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.09.065>

Lei H., Peng Z., Yigang H., Zhao Yang Z. Vegetation succession and soil infiltration characteristics under different aged refuse dumps at the Heidaigou opencast coal mine // Global Ecology and Conservation. 2015. Vol. 4. P. 255–263. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2015.07.006>

Liu X., Zhou W., Bai Z. Vegetation coverage change and stability in large open-pit coal mine dumps in China during 1990–2015 // Ecological Engineering. 2016. Vol. 95. P. 447451. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.06.051>

Sokolov D.A., Androkhonov V.A., Abakumov E.V. Soil formation in technogenic landscapes: trends, results, and representation in the current classifications (Review) // Tomsk State University Journal of Biology. 2021. No. 56. P. 6–32. <https://doi.org/10.17223/19988591/56/1>

Поступила в редакцию 21.03.2024

Принята 23.04.2024

Опубликована 13.05.2024

Сведения об авторах:

Скотарева Анна Евгеньевна – студентка 2 курса Новосибирского национального исследовательского государственного университета (г. Новосибирск, Россия); skotareva04@mail.ru

Иванов Никита Александрович – студент 2 курса Новосибирского национального исследовательского государственного университета (г. Новосибирск, Россия); n.ivanov5@g.nsu.ru

Соколов Денис Александрович – доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории рекультивации почв ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск, Россия); sokolovdenis@issa-siberia.ru

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Статья доступна по лицензии [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Assessment of factors determining the rate and direction of plant communities development on coal mining spoils (the case study of the Gorlovskoye anthracite deposit)

© 2024 A. E. Skotareva^{1,2}, N. A. Ivanov¹, D. A. Sokolov²

¹Novosibirsk State University, st. Pirogova, 1, Novosibirsk, Russia. E-mail: skotareva04@mail.ru

²Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Lavrentieva 8/2, Novosibirsk, Russia. E-mail: sokolovdenis@issa-siberia.ru

The aim of the study. Identification and assessment of specific succession processes on self-revegetating coal mining spoils of the Gorlovskoye anthracite deposit, as related to the abiotic factors.

Location and time of the study. The coal mining spoils of the Gorlovskoye anthracite deposit (54.568880 NL, 83.588956 EL), Novosibirsk region, Iskitimsky district, June 2023.

Methods. The properties of soil substrates in technogenic landscapes were determined by officially attested and widely used methods of soil analyses. In field conditions, soil hardness was measured with a penetrometer, then soil density was calculated from its values using the dependence function. Total carbon and nitrogen contents were determined using a Perkin Elmer 2400 Series II CHNS/O analyzer. Statistical processing of the data was carried out using cluster, principal components and Spearman's correlation analyses.

Results. In the anthracite coal mining spoils in the forest-steppe conditions of West Siberia, the high content of physical clay and clay-producing rocks in the developing soils promotes predominantly herbaceous plant groups, whereas slope areas with a high content of stones benefits the growth of woody vegetation.

Keywords: reclamation; embryozems; phytocenoses of technogenic landscapes; coal mining spoils.

How to cite: Skotareva A.E., Ivanov N.A., Sokolov D.A. Assessment of factors determining the rate and direction of plant communities development on coal mining spoils (the case study of the Gorlovskoye anthracite deposit). *The Journal of Soils and Environment*. 2024. Vol. 7. No. 2. e259. DOI: [10.31251/pos.v7i2.259](https://doi.org/10.31251/pos.v7i2.259)

FUNDING

The study was financially supported by the Russian Science Foundation (Project No. 23-24-00116).

REFERENCES

- Androkhanov V.A., Sokolova N.A. Soil-ecological state of the surface of dumps of anthracite deposits (on the example of the Gorlovskoye anthracite deposit, Novosibirsk region). *Achievements of Science and Technology in Agribusiness*. 2022. Vol. 36. No. 5. P. 31–36. (in Russian). <https://doi.org/10.53859/02352451-2022-36-5-31>
- Baturina V.B. Features of humification and mineralization of root mass in soils of technogenic landscapes. Abstract of Dissertation ... Cand. of Biol. Sci. Novosibirsk, 2005. 19 p. (in Russian).
- Voronov A.G. *Geobotany*. 2nd ed. Vysshaya Shkola Publ., 1973. 384 p. (in Russian).
- Glebova O.I. Biogeographical diagnostics of Kuzbassembryozems. Abstract of Dissertation ... Cand. of Biol. Sci. Novosibirsk, 2005. 18 p. (in Russian).
- Gossen I.N., Kulizhsky S.P., Danilova E.B., Sokolov D.A. Assessment approach to assessing the soil-ecological state of technogenic landscapes of Siberia (using the example of dumps of anthracite, hard and lignite deposits). *Bulletin of Novosibirsk State Agrarian University*. 2016. No. 2 (39). P. 71–81. (in Russian).
- GOST 26423-85. Soils. Methods for determination of specific electric conductivity, pH and solid residue of water extract. Moscow: Standard Publishing House, 1985. 4 p. (in Russian).
- GOST 12536-2014. Soils. Methods of laboratory granulometric (grain-size) and microaggregate distribution. Moscow: Standardinform Publ., 2015. 18 p. (in Russian).
- GOST 26213-21. Soils. Methods for determination of organic matter. Moscow: Russian Standardization Institute, 2021. 7 p. (in Russian).
- Kandrashin E.R. Biota succession in technogenic ecosystems (on the example of the Kuznetsk coal basin). Abstract of Dissertation ... Cand. of Biol. Sci. Dnepropetrovsk, 1989. 17 p. (in Russian).
- Kurachev V.M., Androkhanov V.A. Classification of soils in technogenic landscapes. *Sibirskij ekologicheskij zhurnal*. 2002. Vol. 9. No. 3. P. 255–261. (in Russian).
- Kurachev V.M., Kandrashin E.R., Ragim-zade F.K. Syngeneticity of vegetation and soils of technogenic landscapes: environmental aspects, classification. *Sibirskij ekologicheskij zhurnal*. 1994. Vol. 1. No. 3. P. 205–214. (in Russian).

- Kusov A.V. Granulometric diagnostics of intrasoil weathering of clastic material in technogenic landscapes. *Sibirskij ekologicheskij zhurnal*. 2007. Vol. 14. No. 5. P. 837–843. (in Russian).
- Lapshina E.I. Vegetation cover. In book: *Novosibirsk region: nature and resources*. Novosibirsk: Nauka Publ., Siberian Branch, 1978. P. 112–124. (in Russian).
- Skotareva A.E., Sokolov D.A. Specificity of succession of phytocenoses on dumps of dense sedimentary rocks (on example of the Gorlovskoye anthracite deposit). In book: *Soils and Environment [Electronic resource]: Collection of scientific papers of the All-Russian scientific conference with international participation, dedicated to the 55th anniversary of the Institute of Soil Science and Agrochemistry SB RAS (Novosibirsk, October 2–6, 2023)*. Novosibirsk: SSA SB RAS, 2023. P. 578–583. (in Russian). <https://doi.org/10.31251/conf1-2023>
- Sokolova N.A. Assessment of the soil-ecological state of coal mine dumps using remote methods (using the example of the Gorlovskoye anthracite deposit). Dissertation ... Cand. of Biol. Sci. Tomsk, 2023. 200 p. (in Russian).
- Sokolova N., Gossen I., Sokolov D. Assessment of the Suitability of Vegetation Indices to Identify Soil and Ecological Condition of the Surface of Anthracite Deposits Dumps. *Ecology and Industry of Russia*. 2020. Vol. 24. No. 1. P. 62–68. (in Russian). <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2020-1-62-68>
- Sokolov D.A. Oxidation-reduction processes in soils of technogenic landscapes. Abstract of Dissertation ... Cand. of Biol. Sci. Novosibirsk, 2009. 17 p. (in Russian).
- Sokolov D.A., Merzlyakov O.E., Domozhakova E.A. Assessment of the lithogenic potential of humus accumulation in the soils of coal deposits in Siberia. *Tomsk State University Journal*. 2015. No. 399. P. 247–253. (in Russian). <https://doi.org/10.17223/15617793/399/40>
- Ufimtsev V.I. Endoecogenesis of *Pinus Sylvestris* L. on dumps of Kuzbass. Dissertation ... Dr. of Biol. Sci. Tomsk, 2023. 420 p. (in Russian).
- Shuklina A.E., Sokolova N.A., Khudyakov S.E., Gossen I.N., Sokolov D.A. Assessment of factors of differentiation of the granulometric composition of soils in technogenic landscapes of the Gorlovka anthracite deposit. In book: *Soils in the biosphere. Proceedings of the All-Russian scientific conference with international participation, dedicated to the 50th anniversary of the Institute of Soil Science and Agrochemistry SB RAS (Novosibirsk, 10–14 September, 2018 / A.I. Syso (ed.). Part II*. Novosibirsk: National Research Tomsk State University, 2018. P. 353–358. (in Russian).
- Androkhanov V.A., Sokolov D.A. Soil evolution and reclamation of technogenic landscapes in Siberia. On book: *Advances in raw material industries for sustainable development goals / V. Litvinenko (ed.)*. Leiden: CRC Press/Balkema, 2021. P. 268–273. <https://doi.org/10.1201/9781003164395>
- Frouz J., Mudrak O., Reitschmiedova E., Walmsley A., Vachova P., ˇSimackova H., Albrechtova J., Moradi J., Kuˇcera J. Rough wave-like heaped overburden promotes establishment of woody vegetation while leveling promotes grasses during unassisted post mining site development. *Journal of Environmental Management*. 2018. Vol. 205. P. 50–58. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.09.065>
- Lei H., Peng Z., Yigang H., Zhao Yang Z. Vegetation succession and soil infiltration characteristics under different aged refuse dumps at the Heidaigou opencast coal mine. *Global Ecology and Conservation*. 2015. Vol. 4. P. 255–263. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2015.07.006>
- Liu X., Zhou W., Bai Z. Vegetation coverage change and stability in large open-pit coal mine dumps in China during 1990–2015. *Ecological Engineering*. 2016. Vol. 95. P. 447451. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.06.051>
- Sokolov D.A., Androkhanov V.A., Abakumov E.V. Soil formation in technogenic landscapes: trends, results, and representation in the current classifications (Review). *Tomsk State University Journal of Biology*. 2021. No. 56. P. 6–32. <https://doi.org/10.17223/19988591/56/1>

Received 21 March 2024

Accepted 24 April 2024

Published 13 May 2024

About the authors:

Anna E. Skotareva – 2nd year student, Novosibirsk State University (Novosibirsk, Russia); skotareva04@mail.ru

Nikita A. Ivanov – 2nd year student, Novosibirsk State University, (Novosibirsk, Russia); n.ivanov5@g.nsu.ru

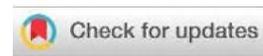
Denis A. Sokolov – Doctor of Biological Sciences, Leading Researcher in the Laboratory of Soil Reclamation in the Institute of Soil Science and Agrochemistry, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); sokolovdenis@issa-siberia.ru

The authors read and approved the final manuscript



The article is available under [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

УДК 631.4

<https://doi.org/10.31251/pos.v7i2.264>

Пространственное распределение ^{137}Cs , ^{40}K , ^{226}Ra и ^{232}Th в почвах г. Мончегорска (Мурманская область)

© 2024 С. А. Иглоvский , А. В. Баженов , Е. Ю. Яковлев 

Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика РАН Н.П. Лавёрова
УрО РАН, Набережная Северной Двины, д. 23, г. Архангельск, 163000, Россия. E-mail: iglovskys@mail.ru

Цель исследования. Установить закономерности пространственного распределения радиоактивности техногенного ^{137}Cs и естественных радионуклидов ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{40}K в почвах г. Мончегорска (Мурманская область).

Место и время проведения. Для изучения удельной активности радиоцезия и естественных радионуклидов ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{40}K в почвах Мончегорска проведены экспедиционные работы летом 2018 года по отбору почвенных проб из верхнего слоя (0–5 см) в 82 точках, включая 68 точек внутри города (городские почвы) и 14 точек на подфакельных территориях, расположенных за его чертой и сильно подверженных техногенному воздействию КГМК ОАО «Североникель» (почвы под факелом). Подобные исследования почв в Мончегорске ранее не проводились.

Методы. В ходе экспедиционных работ и лабораторных исследований использовали почвенный, радиологический, математико-статистический методы. При проведении гамма-спектрометрических измерений радионуклиды ^{137}Cs , ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K определили на низкофоновом полупроводниковом гамма-спектрометре ORTEC (США) на базе коаксиального германиевого детектора GEM10P4–70 высокой чистоты (HPGe) с процессором импульсных сигналов SBS-75 и программного обеспечения Гамма-про. Разрешение гамма-спектрометра по линии 1,33 МэВ (^{60}Co) составило 1,75 кэВ, а относительная эффективность – 15%. Калибровку и контроль качества гамма-спектрометрических измерений осуществляли с использованием измерений объемной активности – сосудами Маринелли (1 л) разной плотности (RITVERZ, Россия-Германия).

Основные результаты. Значения удельной активности радионуклидов в почвах Мончегорска составили: для ^{137}Cs – до 31,3 Бк/кг в черте города и до 63,4 Бк/кг в зоне влияния площадки «Североникель» на подфакельных территориях; для ^{226}Ra – до 14,2 и 21,6 Бк/кг; для ^{232}Th – до 18,3 и 17,0 Бк/кг; для ^{40}K – до 498 и 317 Бк/кг, соответственно.

Заключение. Гамма-съемка территории Мончегорска не выявила аномалии радиационного фона. Мощность дозы гамма-излучения территории города не превышает 0,074 мкЗв/час, что ниже значений по России (от 0,04 до 0,20 мкЗв/ч). Полученные данные по удельной активности техногенного ^{137}Cs и естественных радионуклидов ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{40}K в почвах Мончегорска характерны для Мурманской области.

Ключевые слова: удельная активность; городские почвы; ^{137}Cs ; ^{40}K ; ^{226}Ra ; ^{232}Th ; Мончегорск; Мурманская область.

Цитирование: Иглоvский С.А., Баженов А.В., Яковлев Е.Ю. Пространственное распределение ^{137}Cs , ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th в почвах г. Мончегорска (Мурманская область) // Почвы и окружающая среда. 2024. Том 7. № 2. e264. DOI: [10.31251/pos.v7i2.264](https://doi.org/10.31251/pos.v7i2.264)

ВВЕДЕНИЕ

Важнейшими источниками антропогенной радиоактивности для территории г. Мончегорска являются стратосферные выпадения в результате атмосферных ядерных испытаний и локальные выпадения в результате испытаний на ядерном полигоне архипелага Новая Земля. Исследования предыдущих лет (Романович и др., 2006; Воробьева и др., 2017; Никанов и др., 2019; Мелентьев, 2021; Kuzmenkova, Vorobuova, 2015) не определили повышенных значений естественной и техногенной радиоактивности в почвах Мурманской области. Удельная активность техногенного ^{137}Cs в верхнем слое почв изменяется от 3 до 60 Бк/кг (Воробьева и др., 2017). Кольский полуостров является местом, потенциально опасным для загрязнения радионуклидами в результате их воздушного переноса (Романович и др., 2006; Никанов и др., 2019; Мелентьев, 2021; Kuzmenkova, Vorobuova, 2015). Загрязнение почв ^{137}Cs соответствует уровню мирового фона; ранее «существенных участков со следами выпадения радиоактивных осадков после аварии на Чернобыльской АЭС не выявлено» (Никанов и др., 2019). Удельная активность естественных радионуклидов ^{226}Ra и ^{232}Th в ненарушенных почвах Хибинской болотной тундры варьирует от 7,03 до 71,06 Бк/кг, в горной тундре — от 15,17 до 27,75 Бк/кг (Воробьева и др., 2017). Так как подавляющая часть населения Арктики

проживает в городах, а данных о пространственном распределении удельной радиоактивности городских почв недостаточно, представляется необходимым изучение их состава как компонента окружающей среды человека.

Цель работы – установить закономерности пространственного распределения радиоактивности техногенного ^{137}Cs и естественных радионуклидов ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{40}K в почвах г. Мончегорска (Мурманская область).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Характеристика района исследования. Значительная часть г. Мончегорска территориально размещена на сравнительно ровной территории, высотой от 120 до 130 м над уровнем моря. Подножие горы Нюд, в пределах которого расположен входящий в территорию города поселок Монча, представляет собой равнинную, наклонную к озеру Монче-губа территорию. Абсолютные отметки поверхности здесь изменяются от 127 м до 180 м вверх по склону. Территория города занимает 36,5 км² (Генеральный план..., 2009). Коренные породы залегают до глубины 30 м и выходят на дневную поверхность на вершинах и крутых склонах гор. Горы относятся к массиву Мончегорского никеленосного плутона и сложены интрузивным комплексом пород – пироксенитами, перидонитами, норитами и габбро-норитами. В пределах равнинной части территории коренные породы представлены гнейсами, кристаллическими сланцами, грано-диоритами, диоритами и диорито-гнейсами, что определяет фон естественных радионуклидов. Четвертичные отложения образованы ледниковыми, флювиогляциальными, озерно-ледниковыми и послеледниковыми образованиями. К площадям с техногенным ландшафтом относится промзона КГМК ОАО «Североникель». Морена залегает повсеместно, непосредственно на коренных породах. В ее разрезе в пределах Мончегорска встречаются супесь; гравелистые, разнозернистые, реже пылеватые пески; суглинок с прослоями пылеватых песков; галечниковые и щебенистые образования. Болотные отложения отмечаются на озерных террасах, в котловинах и других понижениях между холмами и грядами, на склонах и развиты на побережье озера Нюдъявр (Генеральный план..., 2009).

Отбор почвенных проб. Летом 2018 года исследовали удельную радиоактивность почв на территории г. Мончегорска. На предварительном этапе были выбраны зоны в соответствии с типом застройки, а также определены точки отбора почвенных проб. Экспедиционные работы по отбору почвенных проб из верхнего слоя (0–5 см) проведены в 82 точках (рис. 1), включая 68 точек во всех районах города (городские почвы) и 14 точек за его чертой – на подфакельных территориях, сильно подверженных техногенному воздействию КГМК ОАО «Североникель» (почвы под факелом). Подобные исследования почв в Мончегорске ранее не проводились.

Методы исследования. Пробы почвы высушили при температуре 105 °С в сушильном шкафу. При проведении гамма-спектрометрических измерений радионуклиды ^{137}Cs , ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K определяли на низкофоновом полупроводниковом гамма-спектрометре ORTEC (США) на базе коаксиального германиевого детектора GEM10P4–70 высокой чистоты (HPGe) с процессором импульсных сигналов SBS-75 и программного обеспечения Гамма-про. Разрешение гамма-спектрометра по линии 1,33 МэВ (^{60}Co) составило 1,75 кэВ, а относительная эффективность – 15%. Калибровка и контроль качества гамма-спектрометрических измерений осуществлялась с использованием измерений объемной активности – сосудами Маринелли (1 л) разной плотности (RITVERZ, Россия-Германия). Для обнаружения ^{226}Ra и определения его активности использовали основные энергии гамма-излучения ^{214}Pb (351,93 кэВ) и ^{214}Bi (609,32 кэВ, 1120,29 кэВ, 1764,49 кэВ). Для идентификации ^{232}Th и измерения его активности использовали основные энергии гамма-излучения ^{212}Pb (238,63 кэВ), ^{228}Ac (911,20 кэВ) и ^{208}Tl (583,19 кэВ, 2614,51 кэВ). Активность радионуклида ^{137}Cs определили по методу гаммы-линии (661,66 кэВ). Активность радионуклида ^{40}K определили с помощью энергии (1460,82 кэВ). Минимальная обнаруживаемая активность при времени воздействия $t=12$ с в геометрии Маринелли для детектора GEM10P4–70 0 составила 0,3 Бк для ^{226}Ra , 15,0 Бк для ^{40}K , 0,1 Бк для ^{137}Cs и 0,2 Бк для ^{232}Th (Yakovlev et al., 2023). Фракционный состав почв определяли с помощью просеивающей машины AS200 (Retsch, Германия) с набором сит от 45 мкм до 2 мм.

Автомобильные гамма-спектрометрические исследования выполнили с использованием мобильного сцинтилляционного гамма-спектрометрического комплекса RS-700 (Канада), который имеет цифровой спектрометр с разрешением (1024 канала), позволяющий сделать измерения общей радиоактивности местности через скорость счета в секунду. В связи с тем, что измерения осуществляли в автомобильном варианте на высоте 1,7 м, то проводили их корректировку с учетом

записи спектров на высоте 1 м с пересчетом фактических результатов на величину ослабления сигнала от поверхности земли. В общей сложности при гамма-спектрометрической съемке было обработано 370 точек измерений (рис. 2). Точность привязки составила $\pm 1-1,5$ м (Мобильная система..., дата обращения 25.09.2023).

Статистическую обработку данных провели с помощью программного обеспечения StatSoft, Inc. (2011) STATISTICA (data analysis software system), version 10, включая расчет среднего арифметического значения, медианы, стандартного отклонения, стандартной ошибки среднего, среднеквадратичного отклонения по выборке, коэффициента вариации.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСЖДЕНИЕ

В г. Мончегорске широкое распространение получили урбиквазиземы с горизонтом «урбик» – зоной аккумуляции и биогенной трансформации органо-минерального и искусственного материала, который сформировался синлитогенно под влиянием хозяйственной деятельности человека. В этом слое содержится не менее 10% антропогенных включений. Реплантоземы формируются на газонах в кварталах с каменной мало- и многоэтажной застройкой (Игловский и др., 2023а; 2023б; 2023в). Хорошо сформировавшийся почвенный профиль отмечается под древесной и кустарниковой растительностью в парковых и лесных зонах (Крячюнас и др., 2020).

В зону застройки домами малой этажности попадают точки отбора почвенных проб № 6, 7, 61, 62; многоэтажными многоквартирными домами – № 1–5, 8–16, 19, 23–28, 31–35, 43–45, 48, 49, 51–53, 55, 56, 60, 68, 69; центра города – № 24, 25, 32, 35; торговыми объектами – № 50, 57; учреждениями здравоохранения – № 65; размещения парков и скверов – № 17, 66; городских лесов, лесопарков – № 20, 22, 23, 54; объектов спорта – № 21, производственно-коммунальной сферы – № 16–18, 29, 38–41, 64, 67; объектов инженерного обеспечения – № 36–38, 59 (рис. 1, 2).

Наибольшие значения удельной активности ^{137}Cs характерны для почв парков, елово-березовых лесопарков, расположенных вдоль Ленинградской набережной (т. 17, 20) недалеко от детского экологического парка и почв южной части города в пределах застройки многоэтажными панельными домами (т. 1). Предполагаем, что древесные насаждения могут выступать здесь в роли «фильтра», улавливая пыль из воздуха и повышая концентрацию загрязняющих веществ в почве за счет опада листьев. Значения активности ^{137}Cs до 20 Бк/кг выявлены в почвах центральной и южной частей города в пределах застройки мало- и многоэтажными многоквартирными жилыми домами (т. 5, 6, 22, 24, 32, 33, 35, 40, 50, 54, 56, 60, 61).

Распределение удельной активности естественных радионуклидов в почвах различных функциональных зон планировочной структуры Мончегорска имеет равномерный характер, причем распределение ^{232}Th и ^{226}Ra довольно схоже (см. рис. 2). Максимальные значения удельной активности ^{40}K определены в почвах березового и ивового леса вблизи пересечения пр. Ленина и ул. Комарова на берегу реки Ньюдай (т. 67), где отмечены высокие значения удельной активности ^{232}Th и ^{226}Ra . Значения удельной активности ^{40}K от 40 до 200 Бк/кг выявлены в почвах западной части города, в производственно-коммунальной зоне (т. 38–40, 58), а также в почвах застройки мало- и многоэтажными жилыми домами в центре (т. 31, 32, 35, 36, 48, 49, 60, 64), восточной части, непосредственно примыкающей к озеру Монча-губа (т. 14, 17, 20, 26, 28), и в южной части города (т. 5, 6, 11, 61). Низкие значения удельной активности ^{40}K (менее 40 Бк/кг) определены в почвах у озера (т. 41) и привокзального шоссе (т. 57), а также в юго-западной части города в пределах многоэтажной панельной застройки вблизи озера Ньюдъявр (т. 1, 3).

В почвах березового и ивового леса вблизи пересечения пр. Ленина и ул. Комарова на берегу реки Ньюдай (т. 67), в районе частного деревянного сектора (т. 39), панельной застройки окрестностей морга (т. 65), ЗАГСа, центрального парка (т. 50, 66), у привокзального шоссе (т. 1, 38), на пересечении ул. Ньюдовской и Новопроложенной на участке малоэтажной застройки (т. 51) отмечено максимальное значение удельной активности ^{226}Ra в почвах. На остальной территории города значения удельной активности ^{226}Ra в почвах было менее 10 Бк/кг.

В почвах березового и ивового леса вблизи пересечения пр. Ленина и ул. Комарова на берегу реки Ньюдай (т. 67), в производственно-коммунальной зоне (т. 39), в районе малоэтажной кирпичной застройки (т. 33), вблизи многоэтажной панельной застройки (т. 4) удельная активность ^{232}Th и ^{226}Ra максимальна. Значения ^{232}Th ниже 6 Бк/кг зафиксированы в почвах парковых и лесопарковых зон, расположенных вдоль Ленинградской набережной (т. 17, 20) и в пробах торфяных отложений у безымянного озера (т. 41) и озера Ньюдъявр (т. 59).

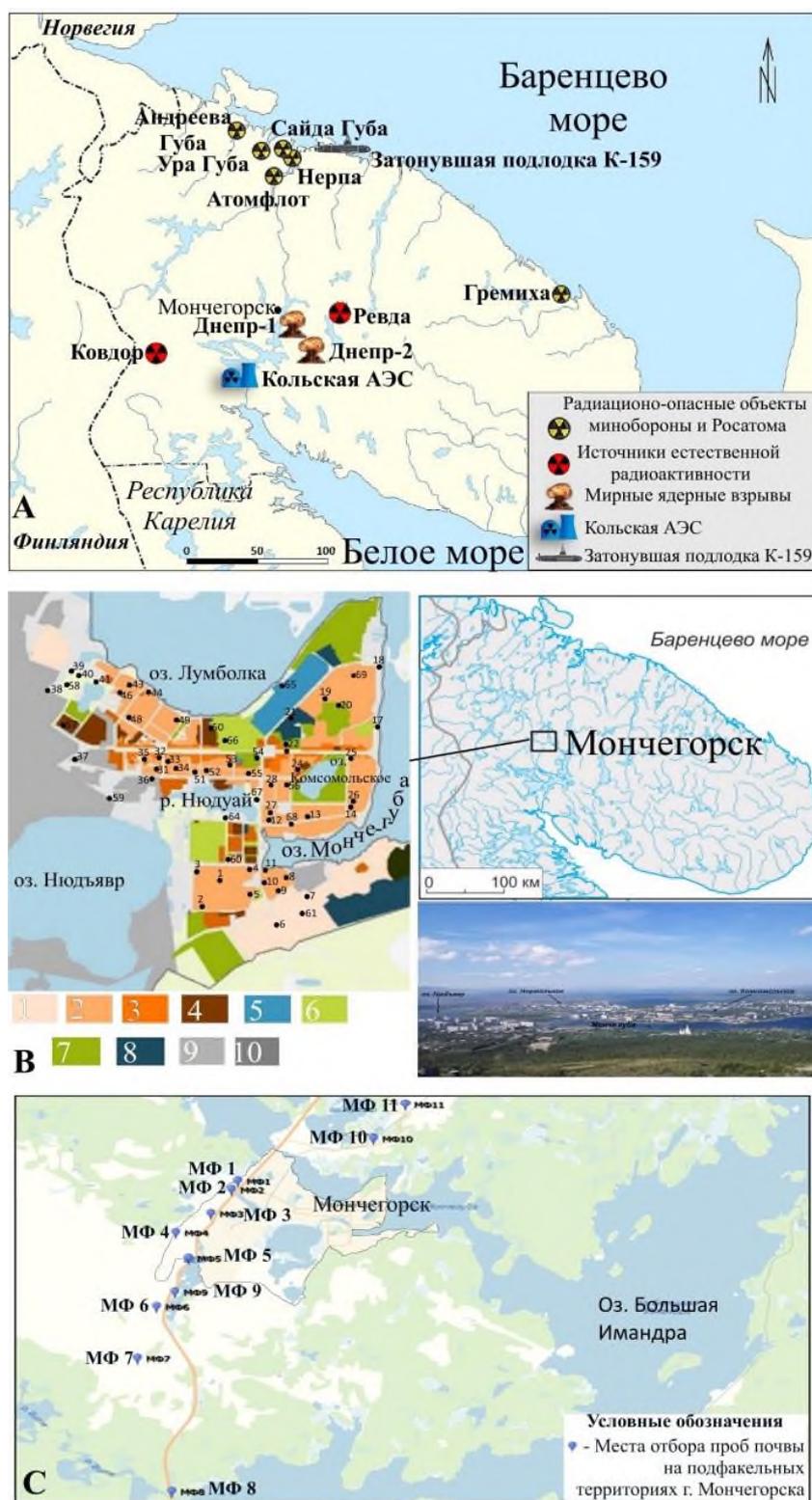


Рисунок 1. Радиационно-опасные объекты на территории Кольского полуострова (А); точки отбора почвенных проб в 2018 г. во всех районах г. Мончегорска (В, городские почвы) на фрагменте карто-схемы функционального зонирования территории (Генеральный план..., 2009) и за чертой города в зоне влияния площадки КГМК ОАО «Североникель» на подфакельных территориях (С, почвы под факелом) на фрагменте космоснимка Google.

Отбор проб городских почв включал следующие зоны: 1 – малоэтажной жилой застройки, 2 – застройки многоэтажными многоквартирными домами, 3 – жилой застройки центра города, 4 – размещения торговых объектов, 5 – размещения учреждений здравоохранения; 6 – парков и скверов, 7 – городских лесов, лесопарков, 8 – объектов спорта, 9 – производственно-коммунальную, 10 – размещения объектов инженерного обеспечения.

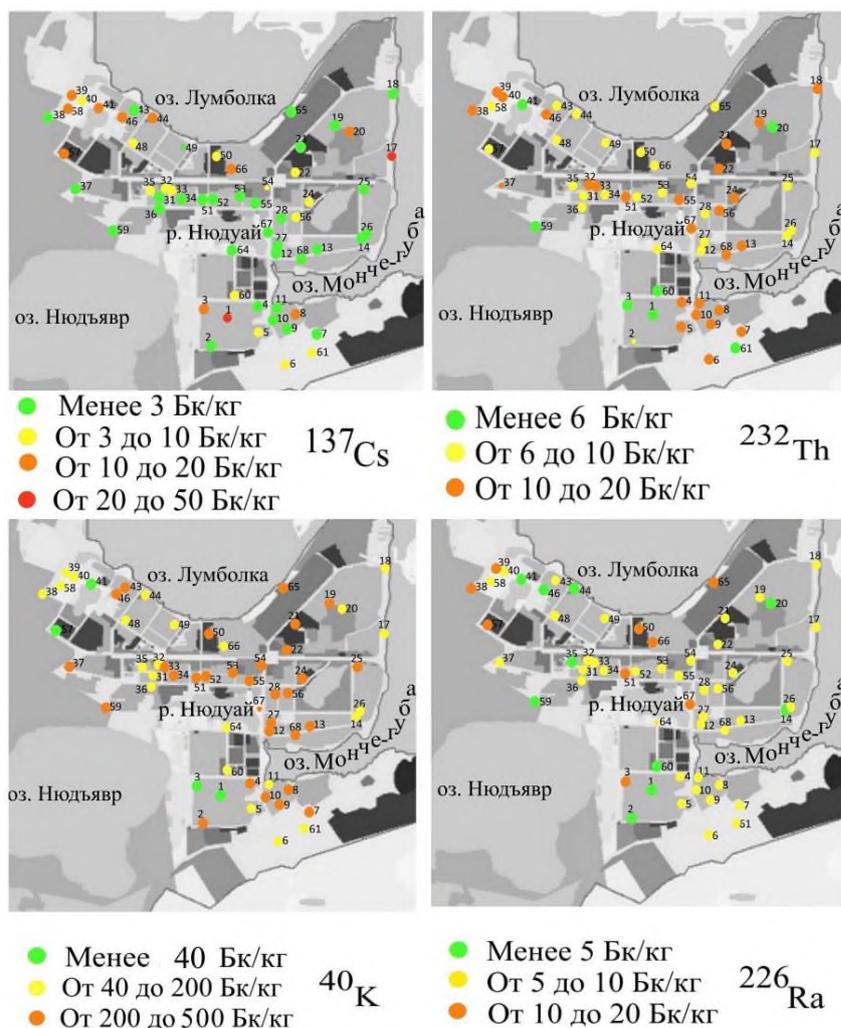


Рисунок 2. Пространственное распределение удельной активности техногенного ^{137}Cs и естественных радионуклидов ^{232}Th , ^{40}K и ^{226}Ra в почвах г. Мончегорска.

Максимальные значения удельной активности радионуклидов в 68 пробах городских почв составили: ^{137}Cs – 31,3, ^{226}Ra – 14,2, ^{232}Th – 18,3, ^{40}K – 498 Бк/кг. Средние значения удельной активности ^{137}Cs , ^{226}Ra и ^{232}Th в зоне влияния промзоны «Североникель» были выше, чем в городских почвах (табл. 1).

Таблица 1

Удельная активность радионуклидов в почвах г. Мончегорска, Бк/кг

Радионуклиды	Почвы*	
	городские	под факелом (МФ1-МФ11)
^{137}Cs	0 – 31,3 $11,78 \pm 8,4(0)$; 61	0 – 63,4 $20,5 \pm 21,9(6,4)$; 12
^{226}Ra	0 – 14,2 $8,08 \pm 2,2(0)$; 61	0 – 21,6 $6,2 \pm 7,2(4,4)$; 7
^{232}Th	0 – 18,3 $10,25 \pm 2,9(10,3)$; 61	0 – 17,0 $11,1 \pm 5,2(12,8)$; 12
^{40}K	0 – 498 $212,94 \pm 68,8(244)$; 61	0 – 317 $176 \pm 91(195)$; 13

Примечание.

*Почвенные пробы отобраны во всех районах г. Мончегорска (городские почвы) и в зоне влияния площадки КГМК ОАО «Североникель» на подфакельных территориях (почвы под факелом). Над чертой – минимальное и максимальное значения, Бк/кг; под чертой – среднее значение и стандартное отклонение, в скобках – медиана, Бк/кг; цифра после точки с запятой – число проб (n) выше нижнего предела обнаружения.

Среднее значение удельной активности ^{137}Cs в почвах вблизи многоэтажных жилых домов составило 11,74 Бк/кг, вблизи объектов производственно-коммунальной сферы – 15,44, малоэтажных жилых домов – 4,55, в районах застройки делового, общественного и коммерческого назначения – 7,58, а в зоне объектов инженерного обеспечения менее 3 Бк/кг (рис. 3).

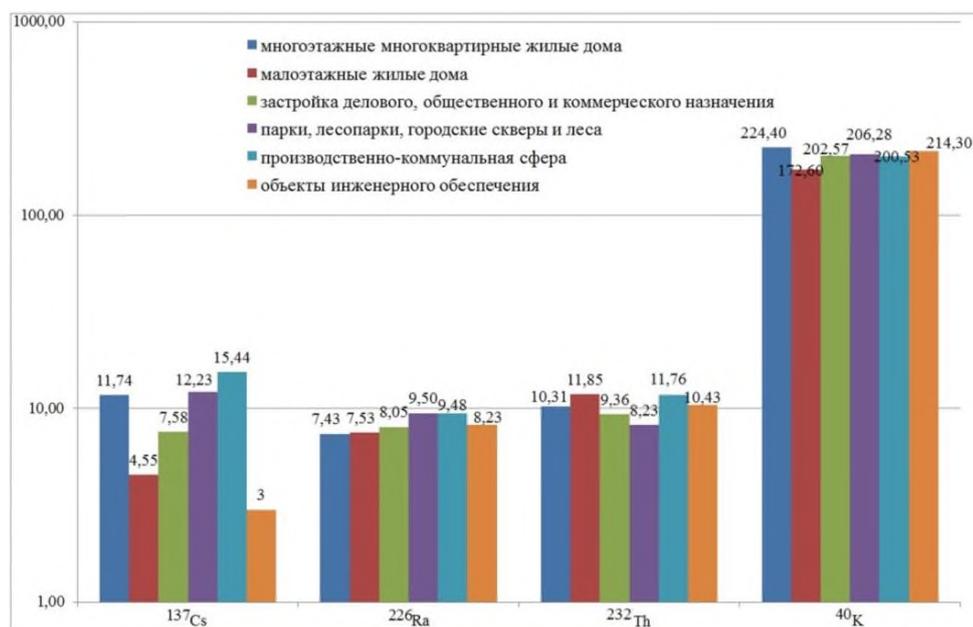


Рисунок 3. Средние значения удельной активности ^{137}Cs и естественных радионуклидов ^{232}Th , ^{40}K , ^{226}Ra в почвах функциональных зон г. Мончегорска (Бк/кг): синий – многоэтажной застройки жилыми домами; красный – застройки малоэтажными домами; зеленый – застройки делового, общественного и коммерческого назначения; фиолетовый – парков, лесопарков, городских скверов и лесов; голубой – производственно-коммунальной сферы; коричневый – объектов инженерного обеспечения. Использован логарифмический масштаб.

В таблице 2 представлены статистические показатели изменения удельной активности радионуклидов в почвах г. Мончегорска. Среднеквадратическое отклонение позволяет оценить, насколько значения из множества могут отличаться от среднего значения. Так, например, для ^{137}Cs это отклонение меньше среднего значения, для ^{226}Ra и ^{232}Th – почти в два раза меньше, а для ^{40}K – почти в три раза меньше среднего значения. Для ^{137}Cs совокупность оказалась неоднородной (73%), для других естественных радионуклидов – однородной (33% или менее).

Таблица 2

Статистические показатели изменения удельной активности радионуклидов в почвах

Статистический параметр	^{137}Cs	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K
Выборка, n	58	58	58	58
Максимум, Бк/кг	31,3	14,2	18,3	498,0
Минимум, Бк/кг	3,1	4,7	4,9	74,8
Среднеквадратичное отклонение по выборке, Бк/кг	8,65	2,25	2,98	69,53
Коэффициент вариации, %	73	28	29	33

Основную часть почвенных образцов составили фракции мелкозема (мелкозернистого песка) с размером 100 и 250 мкм (по 27 и 24%, соответственно). Минимальное количество было характерно для фракции от тонкой глины до среднезернистого ила (пелиты) – с размером <45 мкм (5%) (рис. 4). Анализ гранулометрического состава почв показал, что состав городских почв в основном представлен фракциями мелкозема с размером 100, 250 и 500 мкм. Преобладают песчаные частицы со значительным содержанием гравия.

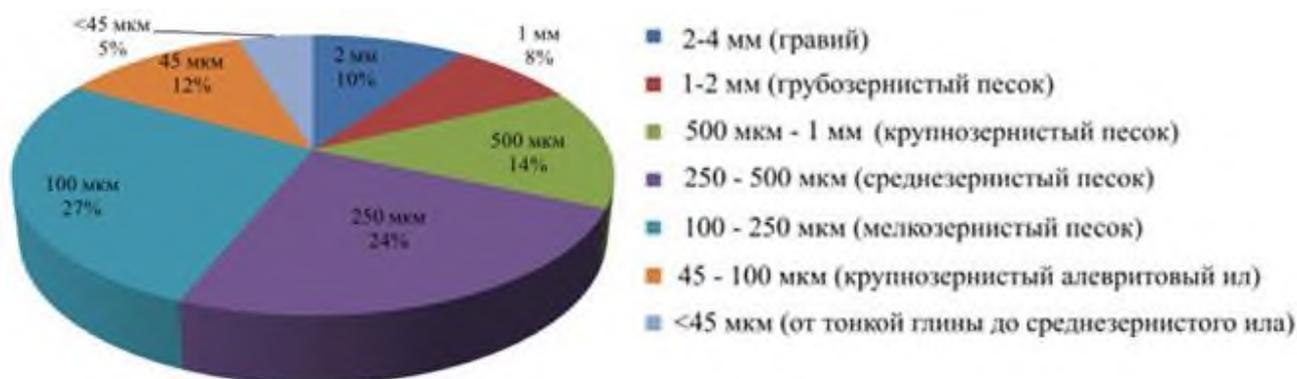


Рисунок 4. Соотношение гранулометрических фракций в почвах г. Мончегорска, %.

Корреляционный анализ удельной активности радионуклидов выявил связь между ^{226}Ra и ^{137}Cs с высоким уровнем статистической значимости (табл. 3). Не обнаружено значимой корреляционной связи между удельной активностью радионуклидов и содержанием частиц почвенного скелета (2 мм), а также с содержанием фракций почвенного мелкозёма (менее 1 мм).

Таблица 3

Корреляционная матрица между удельной активностью радионуклидов в почвах и содержанием частиц почвенного скелета (2 мм), фракций почвенного мелкозёма (менее 1 мм)*

	2 мм	1 мм	500 мкм	250 мкм	100 мкм	45 мкм	<45 мкм	^{137}Cs	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K
2 мм	1										
p-value	-										
1 мм	0,11	1									
p-value	0,40	-									
500 мкм	0,00	0,68	1								
p-value	0,98	0,00	-								
250 мкм	-0,33	-0,35	0,15	1							
p-value	0,01	0,01	0,28	-							
100 мкм	-0,65	-0,65	-0,54	0,19	1						
p-value	0,00	0,00	0,00	0,17	-						
45 мкм	-0,39	-0,23	-0,60	-0,48	0,40	1					
p-value	0,00	0,09	0,00	0,00	0,00	-					
<45 мкм	0,02	-0,18	-0,55	-0,66	0,12	0,77	1				
p-value	0,87	0,18	0,00	0,00	0,39	0,00	-				
^{137}Cs	0,15	-0,02	0,19	0,20	-0,18	-0,26	-0,19	1			
p-value	0,48	0,94	0,36	0,34	0,40	0,21	0,35	-			
^{226}Ra	-0,06	-0,17	-0,12	-0,03	0,14	0,23	0,02	0,70	1		
p-value	0,69	0,24	0,41	0,83	0,35	0,11	0,88	0,00	-		
^{232}Th	0,12	-0,02	0,10	0,02	-0,10	-0,12	-0,05	-0,19	0,19	1	
p-value	0,41	0,91	0,48	0,88	0,50	0,41	0,74	0,44	0,19	-	
^{40}K	0,00	-0,01	-0,18	-0,33	0,11	0,26	0,31	-0,43	-0,02	0,17	1
p-value	0,99	0,92	0,19	0,02	0,42	0,06	0,02	0,05	0,89	0,24	-

Примечание.

*Градиенты силы связи обозначены цветом от красного с минимальным до зелёного с максимальным значением коэффициента корреляции; критические значения коэффициентов корреляции выделены жирным цветом. p-value – наименьшее значение уровня значимости.

В рамках исследований Мончегорска была проведена гамма-съемка местности (рис. 5) с использованием мобильного гамма-спектрометра RS-700 (Мобильная система..., дата обращения 25.09.2023). В пределах города можно выделить три локальные зоны гамма-излучения (от 0,056 до 0,074 мкЗв/ч), которое, тем не менее, не превышает средних значений по России (от 0,04 до 0,20 мкЗв/ч). Западная граница одной из этих зон расположена в районе застройки панельными многоэтажными домами по ул. 10 Гвардейской дивизии и Школьной. Далее центральная зона тянется вдоль пр. Metallургов и ул. Комсомольской до пересечения с ул. Нюдовской. Северо-восточная зона значений гамма-излучения приурочена к кварталу с панельными многоэтажными домами в районе Ленинградской набережной и ул. Кирова.

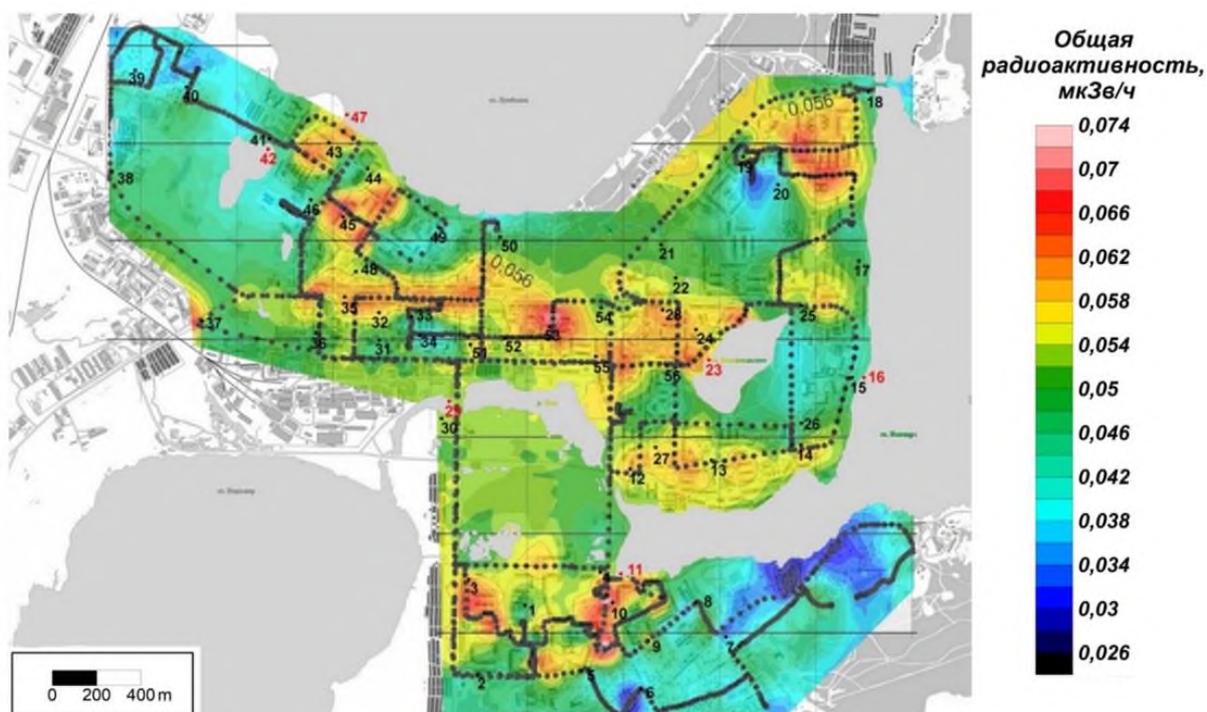


Рисунок 5. Гамма-съемка территории г. Мончегорска с использованием мобильного гамма-спектрометра RS-700. Пунктиром показаны автомобильные маршруты измерений мощности дозы гамма-излучения.

Южная зона значений приурочена к панельным многоэтажным домам в районе ул. Грузовой и Моршковой и южной части пр. Ленина. Также можно выделить две зоны гамма-излучения на востоке города с меньшими значениями в районе пятиэтажных панельных домов по ул. Бредова и пр. Metallургов. Повышение значений гамма-излучения в г. Мончегорске характерны для территорий с кирпичной застройкой 70-80-х годов XX века и в районах расположения малых архитектурных форм, построенных с применением гранита. В остальных частях города значения общей гамма-активности составили менее 0,05 мкЗв/ч, а в юго-восточной (Свято-Вознесенский кафедральный собор) и северо-западной частях города (район ул. Северной) значения были менее 0,03 мкЗв/ч (см. рис. 5).

ВЫВОДЫ

1. Максимальное значение удельной активности техногенного ^{137}Cs в почвах г. Мончегорска составило 31,3 Бк/кг вблизи объектов производственно-коммунальной сферы. Среднее значение удельной активности ^{137}Cs в почвах составило: возле многоэтажных жилых домов – 11,74 Бк/кг, объектов производственно-коммунальной сферы – 15,44 Бк/кг, малоэтажных жилых домов – 4,55 Бк/кг, застройки делового, общественного и коммерческого назначения – 7,58 Бк/кг, объектов инженерного обеспечения – менее 3 Бк/кг.

2. Максимальные значения удельной активности естественных радионуклидов в почвах г. Мончегорска составили: для ^{226}Ra – 14,2 Бк, ^{232}Th – 18,3 и ^{40}K – 498 Бк/кг. Распределение средних значений удельной активности данных радионуклидов в почвах различных функциональных зон планировочной структуры города имело равномерный характер.

3. В зоне влияния площадки КГМК ОАО «Североникель» на подфакельных территориях средние значения удельной активности ^{137}Cs , ^{226}Ra и ^{232}Th в почвах были выше, чем в черте города. Максимальное значение удельной активности ^{137}Cs достигало 63,4 Бк/кг в почвах под факелом на юго-западе от Мончегорска. Удельная активность ^{40}K в городских почвах была ниже. Более высокие значения удельной активности ^{137}Cs , ^{226}Ra , ^{232}Th в почвах на подфакельных территориях могут быть связаны с рекультивационными работами, в том числе с перемешиванием почвенных горизонтов.

4. Мощность дозы гамма-излучения территории г. Мончегорска не превышает 0,074 мкЗв/час, что ниже значений по России (от 0,04 до 0,20 мкЗв/ч). Более высокие значения характерны для территорий с кирпичной застройкой 70-80-х годов XX века и в районах расположения малых архитектурных форм, построенных с применением гранита.

5. Полученные данные по удельной активности техногенного ^{137}Cs и естественных радионуклидов ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{40}K в почвах г. Мончегорска характерны, в целом, для Мурманской области. Гамма-съемка территории Мончегорска не выявила аномалии радиационного фона.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ проекта 122011300333-1).

ЛИТЕРАТУРА

Воробьева Т. А., Евсеев А. В., Кузьменкова Н. В. Радиогеохимические исследования состояния ландшафтов Кольского полуострова // Арктика: экология и экономика. 2017. Том 26. № 2. С. 17–26. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2017-2-17-26>

Генеральный план города Мончегорска. Пояснительная записка. ОАО Российский институт градостроительства и инвестиционного развития. Москва, 2009. 68 с. URL: <https://monchegorsk.gov-murman.ru/vlast/administratsiya/sostav/otdel-arkhitektury-i-gradostroitelstva/generalnyy-plan-goroda-monchegorska/generalnyy-plan-goroda-monchegorska/%D0%9F%D0%BE%D1%8F%D1%81%D0%BD%D0%B8%D1%82%D0%B5%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%B0%D1%8F%20%D0%B7%D0%B0%D0%BF%D0%B8%D1%81%D0%BA%D0%B0.pdf> (дата обращения 10.04.2024).

Игловский С.А., Баженов А.В., Крячюнас В.В., Яковлев Е.Ю. Особенности пространственного распределения ^{137}Cs , ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th в почвах города Кировска (Мурманская область) // Арктика: экология и экономика. 2023а. Том 13. № 3. С. 473–481. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2023-3-473-481>

Игловский С. А., Баженов А. В., Яковлев Е. Ю. Особенности пространственного распределения ^{137}Cs , ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th в почвах г. Полярные Зори (Мурманская область) // Вестник геонаук. 2023б. №10 (346). С. 51–56. <https://doi.org/10.19110/geov.2023.10.6>

Игловский С. А., Баженов А. В., Яковлев Е. Ю. Пространственное распределение ^{137}Cs , ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th в почвах г. Оленегорска (Мурманская область) // Почвы и окружающая среда. 2023в. Том 6. № 4. е225. <https://doi.org/10.31251/pos.v6i4.225>

Крячюнас В.В., Кузнецова И.А., Котова Е.И., Игловский С.А., Мироненко К.А., Суханов С.Г. Содержание и особенности распределения естественных и техногенных радионуклидов в почвах малого арктического города // Экология человека. 2020. № 5. С. 11–20. <https://doi.org/10.33396/1728-0869-2020-5-11-20>

Мелентьев Г.Б. Естественная радиоактивность редкометалльно-специализированного минерального сырья и урбанизированных территорий Карело-Кольского региона как фактор их радиоэкологической оценки // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. 2021. № 2. С. 27–43. <https://doi.org/10.17076/geo1284>

Мобильная система радиометрического контроля RS-700. URL: <https://agtsys.ru/storage/instructions/December2019/tPgJvmbN-67MXpVzMiiOE.pdf> (дата обращения 25.09.2023).

Никанов А.Н., Гудков А.Б., Шелков М.В., Попова О.Н., Щербина Ф.А., Щербина А.Ф. Характеристика радиационного фона арктической территории в районе расположения горно-обогачительного комплекса // Экология человека. 2019. № 5. С. 11–14. <https://doi.org/10.33396/1728-0869-2019-5-11-14>

Kuzmenkova N.V., Vorobyova T.A. Landscape-geochemical mapping of territory in the North-West of Kola Peninsula // Journal of Geochemical Exploration. 2015. Vol. 154. P. 194–199. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2014.12.016>

Поступила в редакцию 15.04.2024

Принята 06.05.2024

Опубликована 14.05.2024

Сведения об авторах:

Иглоvский Станислав Анатольевич – кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории экологической радиологии Института геодинaмики и геологии Федерального исследовательского центра комплексного изучения Арктики им. академика РАН Н.П. Лавёрова УрО РАН (г. Архангельск, Россия); iglovskys@mail.ru

Баженов Александр Викторович – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории экологической радиологии Института геодинaмики и геологии Федерального исследовательского центра комплексного изучения Арктики им. академика РАН Н.П. Лавёрова УрО РАН (г. Архангельск, Россия); abv-2009@yandex.ru

Яковлев Евгений Юрьевич – кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией экологической радиологии Института геодинaмики и геологии Федерального исследовательского центра комплексного изучения Арктики им. академика РАН Н.П. Лавёрова УрО РАН (Архангельск, Россия); yakov24lev99@mail.ru

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.



Статья доступна по лицензии [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Spatial distribution of ^{137}Cs , ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th in soils of Monchegorsk city (Murmansk region)

© 2024 S. A. Iglovsky , A. V. Bazhenov , E. Y. Yakovlev 

N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Arkhangelsk, Russia. E-mail: iglovskys@mail.ru

The purpose of the study was to establish the patterns of spatial distribution of radioactivity of technogenic ^{137}Cs and natural radionuclides ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{40}K in urban soils of Monchegorsk.

Location and time of the study. Soil samples, were collected in summer 2018 in the Monchegorsk city, Murmansk region, Russia. To study the specific activity of radiocesium and natural radionuclides, soil samples were taken from topsoil (0-5 cm) at 82 sites, including 68 sites within the city territory (urban soils) and 14 sites beyond the city limits in the subtorch areas strongly affected by the Severonickel factory. Similar studies of urban soils in Monchegorsk had not been carried out previously.

Methods. During expeditionary work and laboratory research, soil, radiological, and mathematical and statistical methods were used. When carrying out gamma spectrometric measurements, radionuclides ^{137}Cs , ^{226}Ra , ^{232}Th and ^{40}K were determined on a low-background semiconductor gamma spectrometer ORTEC (USA) based on a high-purity coaxial germanium detector GEM10P4-70 (HPGe) with a SBS-75 pulse signal processor and Gamma-software. The resolution of the gamma spectrometer along the 1.33 MeV line (^{60}Co) was 1.75 keV, and the relative efficiency was 15%. Calibration and quality control of gamma spectrometric measurements was carried out using volumetric activity measurements with I-L Marinelli vessels of different densities (RITVERZ, Russia-Germany).

Main results. The values of specific activity of radionuclides in soil samples were as following: in the technogenic ^{137}Cs up to 31.3 Bq/kg and in the subtorch soils up to 63.4 Bq/kg. Specific activity of natural radionuclides in urban soils reached to 14.2 Bq/kg for ^{226}Ra , whereas in the subtorch soils it reached 21.6 Bq/kg. The specific activity of ^{232}Th in urban soils reached 18.3 Bq/kg, with 17 Bq/kg registered for the subtorch soils. As for ^{40}K , its specific activity reached 498 Bq/kg in the urban soils and 317 Bq/kg.

Conclusion. The gamma survey of the Monchegorsk territory did not reveal any anomaly in radiation. The dose rate of gamma radiation in the city does not exceed 0.074 $\mu\text{Sv}/\text{hour}$, which is less than the values elsewhere in Russia, ranging from 0.04 to 0.20 $\mu\text{Sv}/\text{hour}$. The obtained data about specific activity of technogenic ^{137}Cs and natural radionuclides ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{40}K in the Monchegorsk soils are typical for the Murmansk region.

Keywords: specific activity; urban soils; ^{137}Cs ; ^{232}Th ; ^{226}Ra ; ^{40}K ; Monchegorsk; Murmansk region.

How to cite: Iglovsky S.A., Bazhenov A.V., Yakovlev E.Yu. Spatial distribution of ^{137}Cs ; ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th in soils of Monchegorsk city (Murmansk region). *The Journal of Soils and Environment*. 2024. 7(2). e264 (in Russian with English abstract). DOI: [10.31251/pos.v7i2.264](https://doi.org/10.31251/pos.v7i2.264)

FUNDING

The study was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. 122011300333-1).

REFERENCES

- Vorobyova T. A., Evseev A. V., Kuzmenkova N. V. Radiogeochemical investigations of the Kola Peninsula landscapes. *Arctic: Ecology and Economy*. 2017. Vol. 26. No. 2. P. 17–26. (in Russian). <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2017-2-17-26>
- General Plan of the City of Monchegorsk. Explanatory note. JSC Russian Institute of Town Planning and Investment Development. Moscow, 2009. 68 p. URL: <https://monchegorsk.gov-murman.ru/vlast/administratsiya/sostav/otdel-arkhitektury-i-gradostroitelstva/generalnyy-plan-goroda-monchegorska/generalnyy-plan-goroda-monchegorska/%D0%9F%D0%BE%D1%8F%D1%81%D0%BD%D0%B8%D1%82%D0%B5%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%B0%D1%8F%20%D0%B7%D0%B0%D0%BF%D0%B8%D1%81%D0%BA%D0%B0.pdf> (accessed on 10.04.2024). (in Russian).
- Iglovsky S.A., Bazhenov A.V., Kriauciunas V.V., Yakovlev E.Yu. Features of the ^{137}Cs , ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th spatial distribution in the soils of the city of Kirovsk (Murmansk region). *Arctic: Ecology and Economy*. 2023a. Vol. 13. No. 3. P. 473–481. (in Russian). <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2023-3-473-481>
- Iglovsky S. A., Bazhenov A. V., Yakovlev E. Y. Specific spatial distribution of ^{137}Cs , ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th in soils of the city of Polyarnyye Zori (Murmansk region). *Vestnik of Geosciences*. 2023b. No. 10 (346). P. 51–56. (in Russian). <https://doi.org/10.19110/geov.2023.10.6>
- Iglovsky S. A., Bazhenov A. V., Yakovlev E. Yu. Spatial distribution of ^{137}Cs , ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th in soils of Olenegorsk city (Murmansk region). *The Journal of Soils and Environment*. 2023b. Vol. 6. No. 4. e225. (in Russian). <https://doi.org/10.31251/pos.v6i4.225>
- Kriauciunas V.V., Kuznetsova I.A., Kotova E.I., Iglovsky S.A., Mironenko K.A., Sukhanov S.G. Natural and technogenic radionuclides in soils in a small Russian arctic town. *Human Ecology*. 2020. No. 5. P. 11–20. (in Russian). <https://doi.org/10.33396/1728-0869-2020-5-11-20>
- Melentiev G.B. Natural radioactivity of rare-metal specialized mineral raw materials and urbanized territories of the Karelian-Kola region as a factor in their radioecological assessment. *Transactions of Karelian Research Centre of Russian Academy of Science*. 2021. No. 2. P. 27–43. (in Russian). <https://doi.org/10.17076/geo1284>
- Mobile radiometric control system RS-700. URL: <https://agtsys.ru/storage/instructions/December2019/tPgJvmbN-67MXpVzMIiOE.pdf> (accessed on 25.09.2023). (in Russian).
- Nikanov A.N., Gudkov A.B., Shelkov M.V., Popova O.N., Shcherbina F.A., Shcherbina A.F. Mining and processing plant activities and the levels of background radiation in an arctic setting. *Human Ecology*. 2019. No. 5. P. 11–14. (in Russian). <https://doi.org/10.33396/1728-0869-2019-5-11-14>
- Kuzmenkova N.V., Vorobyova T.A. Landscape-geochemical mapping of territory in the North-West of Kola Peninsula. *Journal of Geochemical Exploration*. 2015. Vol. 154. P. 194–199. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2014.12.016>

Received 15 April 2024

Accepted 06 May 2024

Published 14 May 2024

About the authors:

Stanislav A. Iglovsky – Candidate of Geographical Sciences, Leading Researcher in the Laboratory of Ecological Radiology of the Institute of Geodynamics and Geology, N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (Arkhangelsk, Russia); iglovskys@mail.ru

Aleksandr V. Bazhenov – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Senior Researcher in the Laboratory of Ecological Radiology of the Institute of Geodynamics and Geology, N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (Arkhangelsk, Russia); abv-2009@yandex.ru

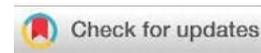
Evgeniy Yu. Yakovlev – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Head of the Laboratory of Ecological Radiology in the Institute of Geodynamics and Geology, N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (Arkhangelsk, Russia); yakov24lev99@mail.ru

The authors read and approved the final manuscript



The article is available under [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

УДК 631.4

<https://doi.org/10.31251/pos.v7i2.265>

Влияние противогололёдных реагентов на свойства почв придорожных газонов г. Новосибирска

© 2024 П. А. Барсуков , О. А. Русалимова 

ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, проспект Академика Лаврентьева, 8/2,
г. Новосибирск, 630090, Россия. E-mail: barsukov@issa-siberia.ru

Цель исследования. Оценить влияние применения противогололёдных реагентов на изменение свойств почв придорожных газонов г. Новосибирска.

Место и время проведения. Сквер и примыкающие к нему придорожные газоны в центральной части г. Новосибирска. Полевые и лабораторные работы выполнены в конце 2023 г. – начале 2024 г.

Методы. Анализ почвенных образцов выполнен следующими методами: приготовление водной вытяжки – при соотношении почва:раствор равном 1:5; определение удельной электрической проводимости и водного pH – с использованием электродов HI763123 и ЭСК-10603, соответственно; водорастворимых сульфатов – с осаждением сульфат-ионов хлористым барием и определением сульфата бария турбидиметрическим методом; водорастворимого натрия – на атомно-абсорбционном спектрометре с пламенной атомизацией Квант-2А; водорастворимых хлоридов – с помощью ионоселективного электрода Эконикс ЭКОМ-С1; водорастворимых фосфатов – спектрофотометрическим методом с образованием молибденовой сини. Статистическая обработка данных проведена методами главных компонент, вариационного, регрессионного, корреляционного и дисперсионного анализов.

Основные результаты. Применение противогололёдных реагентов (ПГР) для обработки дорог и тротуаров наиболее значительно изменяет содержание водорастворимых натрия и хлора в почвах придорожных газонов: уровень Na достигает 443 мг/кг почвы, Cl – 511 мг/кг. Концентрация сульфатов и фосфатов в газонных почвах при использовании ПГР изменяется в значительно меньшей степени. Взаимозависимость содержания хлора и натрия в почве описывается уравнением линейной регрессии с высоким коэффициентом детерминации (R^2), равным 0,92: $Cl = 1,503 \times Na - 34,655$, где концентрации Cl и Na представлены в мг/кг. Обнаружена тесная положительная связь ($R^2 = 0,87$) между суммой всех четырёх анализируемых ионов (SI) и удельной электропроводности (ЕС), описываемая линейным уравнением $SI = 0,0078 \times EC - 0,985$, где SI (сумма ионов Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} и PO_4^{2-}) представлена в смоль(экв)/кг, а ЕС – в мкСм/см.

Заключение. В почвах придорожных газонов, по сравнению с центральной частью прилегающего сквера, установлено значительное повышение содержания водорастворимых натрия и хлора: в 7–24 раза и 30–80 раз, соответственно. Увеличение концентрации этих элементов сопровождалось повышением в 3,3 раза величины удельной электрической проводимости (характеризующей общий уровень засоления почвы легкорастворимыми солями) и изменением реакции среды со «слабощелочной» на «умеренно щелочную». Такие значительные изменения химических свойств придорожных урбаноземов обусловлены применением ПГР, что может вызывать угнетение роста и развития газонных растений, прежде всего древесных культур, менее адаптированных к солевому загрязнению почвы, вплоть до их гибели.

Ключевые слова: почвы придорожных газонов; урбаноземы; противогололёдные реагенты; антропогенное засоление; хлориды; сульфаты; фосфаты; водорастворимый натрий; щёлочность.

Цитирование: Барсуков П.А., Русалимова О.А. Влияние противогололёдных реагентов на свойства почв придорожных газонов г. Новосибирска // Почвы и окружающая среда. 2024. Том 7. № 2. e265. DOI: [10.31251/pos.v7i2.265](https://doi.org/10.31251/pos.v7i2.265).

ВВЕДЕНИЕ

Применение противогололёдных реагентов (ПГР) в крупных городах является общераспространённой практикой в странах, где в зимний период хотя бы периодически температура опускается ниже нуля градусов по Цельсию. Среди ПГР для дорог самыми популярными в мире являются хлористые соли (Cunningham et al., 2008; Hofman et al., 2012). Масштабы и интенсивность воздействия на окружающую среду солей для борьбы с гололедом на дорогах беспокоит ученых-экологов уже несколько десятилетий (Hawkins, 1971). В последние годы количество применяемых соледержащих ПГР увеличивается, несмотря на то что последствия применения солей до сих пор остаются малоизученными. Существует множество доказательств того, что соли накапливаются в водных системах, угнетают рост наземной растительности и могут изменять состав растительных сообществ. Однако, достоверно не установлено, как далеко эти реагенты распространяются от места из использования (дорог), какие механизмы наиболее важны для их миграции, какое их количество

закрепляется в почве, поглощается растениями, выщелачивается с внутрипочвенным стоком и мигрирует с поверхностным стоком в водные объекты (Cunningham et al., 2008).

За последние два десятилетия во многих городах России произошло значительное увеличение применения соледержащих смесей для противогололедной обработки дорожных покрытий и пешеходных зон (Шевченко и др., 2008; Пироговская, Хмелевский, 2010; Лысиков, 2017; Никифорова и др., 2016; Лопатина и др., 2020). В частности, для Москвы установлено, что ПГР являются одними из основных загрязнителей почвенного покрова (Николаев и др., 2001; Доклад ..., 2018; Малышева и др., 2018; Наместникова, Бузаева, 2019).

Поскольку большинство ПГР представляют собой химически активные соединения – хлористые соли (содержащие, преимущественно, ионы хлора, натрия и кальция), то неблагоприятные экологические последствия для городской среды при интенсивном применении ПГР связаны с засолением почв, которое в естественных условиях более характерно для солончаков с хлоридным типом засоления. Большинство растений (особенно древесных) очень чувствительны к засолённости почвы. Накопление солей в корнеобитаемом слое почв приводит к угнетению, а в ряде случаев и к гибели зелёных насаждений города. Кроме того, при засолении разрушается агрегатная структура почв и даже их гранулометрический состав, в результате чего наблюдается увеличение фракции мелкой пыли (Малышева и др., 2018), что вероятно может повысить содержание мелкодисперсных пылевых частиц в приземном воздухе.

Масштабное применение ПГР вызывает обеспокоенность не только экологов и широкой общественности, но и привлекает внимание контролирующих органов. Одним из распространённых ПГР в России является «Бионорд» (Противогололедные ..., 2016), который производится с 2006 г. и имеет противоречивые отзывы о его воздействии на биоту (Шишова и др., 2017; Лопатина и др., 2020).

Загрязнение городских почв ПГР является серьёзной проблемой на сегодняшний день, поэтому исследования по оценке последствий, эффективности и экологической безопасности применения ПГР представляются крайне актуальными (Крятов и др., 2014; Водянова и др., 2016). В дополнении к этому, ряд авторов отмечает, что система экологического мониторинга объектов окружающей среды (почвы, растительность, водные объекты), подвергающихся воздействию различных реагентов, требует контроля химической безопасности (Малышева и др., 2018). При долговременном применении соледержащих смесей необходимо иметь представление о пределах устойчивости почвы к этому виду химического загрязнения, от которого, в том числе, зависит и устойчивость растительного компонента.

На территории России данные об исследованиях изменений химического состава почв под влиянием ПГР немногочисленны, и преимущественно выполнены в Европейской ее части. Поэтому цель работы – оценить влияние применения ПГР на изменение свойств почв придорожных газонов г. Новосибирска, в частности, на кислотность/щёлочность и содержание ионов легкорастворимых солей в поверхностном слое почв придорожных газонов вдоль центральных улиц города.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Полевая часть экспериментальной работы проведена в центре города Новосибирска, на территории Первомайского сквера (55°01'37" ... 55°01'43" с.ш., 82°55'01" ... 82°55'15" в.д.) и вблизи Собора Александра Невского (55°01'04" ... 55°01'07" с.ш., 82°55'25" в.д.). Отбор почвенных образцов выполнен на следующих участках:

- Участок № 1 – газон разделительной полосы между двумя проезжими частями Красного проспекта, вблизи Собора Александра Невского; древесная культура на газоне – берёза.
- Участок № 2 – газон Первомайского сквера вдоль Красного проспекта; древесная культура на газоне – липа.
- Участок № 3 – газон Первомайского сквера вдоль ул. Максима Горького; древесная культура на газоне – лиственница.
- Участок № 4 – газон Первомайского сквера вдоль ул. Советская; древесная культура на газоне – яблоня.
- Участок № 5 – центральная часть территории Первомайского сквера, равноудалённая от всех улиц, его окружающих и, соответственно, удалённая от источников загрязнения противогололедными реагентами; древесные культуры – сосна обыкновенная, рябина, ель, лиственница. Этот участок можно рассматривать в качестве внутригородского **условного фона (УФ)**.

Смешанные почвенные образцы с каждого участка отобраны из поверхностного слоя почвы тростевидным буром в 10-кратной повторяемости, причём каждый смешанный образец составляли из 4–5 индивидуальных образцов. На участках № 1–4 почвенные образцы отбирали на расстоянии 1–2 м от

дорожного полотна. Глубина отбора образцов с участков № 1, 4 и 5 составляет – 0–30 см, на участке № 2 – 0–10 см, на участке № 3 – 0–10/15 см. Ограниченная глубина слоя отбора почвенных образцов с участков № 2 и 3 связана с тем, что ниже 10/15 см от поверхности почвы залегают прослойки фрагментов строительных отходов. Срок отбора всех почвенных образцов – 25 ноября 2023 г.

Термины «почвы» и «почвенные образцы» используются в определенной степени как условные, поскольку тот субстрат, который был отобран для анализа, строго говоря, не является почвой, а в соответствии с современной классификацией почв России (Классификация ..., 2004) представляет собой «техногенные поверхностные образования» (ТПО) и относится к группе «Квазиземы», подгруппе «Урбиквазиземы». Эта подгруппа отчасти соответствует урбаноземам в классификации городских почв М.Н. Строгановой (Полевой ..., 2008). В соответствии с международной классификацией почв (IUSS ..., 2022) ТПО относятся к реферативной почвенной группе Technosols. Поскольку классификация городских почв не является целью данной публикации, то ниже по тексту исследуемые почвы газонов обозначаются, в т.ч., и как урбаноземы.

В последние годы в г. Новосибирске получило распространение применение на дорожных покрытиях в зимнее время противогололедного реагента «Бионорд». В соответствии с техническими условиями «Бионорд» выпускается в 4 модификациях (Противогололедные ..., 2016), химический состав которых приводится в таблице 1. Наиболее распространённой разновидностью является «Бионорд Универсальный», состоящий на 45–89% из хлорида натрия и на 10–30% – из хлорида кальция. По остальным 4 компонентам регламентируется только верхняя граница их содержания; поэтому даже в случае отсутствия этих соединений в ПГР его состав будет соответствовать заявленному. Поскольку у нас отсутствуют достоверные сведения о количестве и разновидностях вносимых ПГР в пределах исследуемой территории г. Новосибирска, мы не можем с уверенностью вычленить влияние ПГР «Бионорд» среди других ПГР, применяемых в последние годы. Однако, учитывая, что химический состав применяемых ПГР относительно однороден (включает преимущественно ионы Cl и Na), то с точки зрения фитотоксичности, различные ПГР приблизительно в равной степени опасны для растений в случае их внесения в эквивалентных дозах по хлору и натрию.

Таблица 1

Химический состав основных разновидностей твёрдых противогололёдных материалов «Бионорд»

Массовая доля соединений	Универсальный	Тротуары	Экстра	Концентрат
хлорид кальция, %	10–30	не более 20	60–98	40–90
хлорид натрия, %	45–89	не более 60	не более 10	10–30
хлорид калия, %	не более 10	не более 20	не более 10	–
карбамид, %	не более 10	не более 20	не более 10	–
формиат натрия, %	не более 15	не более 30	не более 40	не более 30
формиат калия, %	не более 15	не более 30	не более 40	–

Анализ отобранных образцов выполнен в соответствии со следующими методами: приготовление водной вытяжки – при соотношении почва : раствор (дистиллированная вода) равном 1 : 5 с последующим анализом в этой вытяжке нижеперечисленных показателей; определение удельной электрической проводимости и водного pH – потенциометрическим способом с использованием электродов HI763123 и ЭСК-10603, соответственно; определение водорастворимых сульфатов – с осаждением сульфат-ионов хлористым барием и определение сульфата бария турбидиметрическим методом; определение водорастворимого натрия – на атомно-абсорбционном спектрометре с пламенной атомизацией Квант-2А, Россия; определение водорастворимых хлоридов – с помощью ионоселективного электрода Эконикс ЭКОМ-Cl; определение водорастворимых фосфатов – спектрофотометрическим методом с образованием молибденовой сини (Теория ..., 2006).

Статистическая обработка данных (вариационный, регрессионный, корреляционный и дисперсионный анализы и анализ нормированных данных методом главных компонент) выполнена с помощью пакета программ Statistica v.13.3.0 (TIBCO Software Inc., Palo Alto, CA, USA). Дисперсионный анализ (стандартный анализ по Фишеру) выполнен при полной рандомизации. Результаты этого анализа (приводимые в таблицах), представлены в виде латинских букв, следующих за числом – средним арифметическим значением того или иного показателя. Одинаковые латинские буквы означают отсутствие достоверных различий, а разные буквы указывают на то, что различия

между средним арифметическим превышают наименьшую существенную разницу (НСР) при уровне значимости 0,05 и 0,01 (доверительной вероятности 95% и 99%, соответственно).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Учитывая химический состав ПГР «Бионорд Универсальный» и иных традиционных ПГР, состоящих преимущественно из хлорида натрия, изученные нами почвы придорожных газонов были проанализированы на водорастворимые формы натрия и хлора, а также сульфаты для дополнительной характеристики типа засоления. Кроме этого, определяли актуальную кислотность/щёлочность (водный pH), удельную электрическую проводимость водной суспензии почвы (ЕС) и фосфаты для дополнительной характеристики анионного состава водной вытяжки (табл. 2).

Значения водного pH варьировали в узком диапазоне: от 7,75 до 8,26. Однако, поскольку разброс этих значений по повторностям был минимальным (что подтверждается очень низкими значениями коэффициента вариации от 1,2% до 4,8%), то различия между некоторыми участками были достоверными. Минимальное значение pH 7,75 (соответствующий градации «слабощелочная» почва) получено для почвы центральной части сквера (участок № 5). Этот участок является наименее загрязнённым в силу удалённости от всех автомобильных дорог и поэтому значения химических свойств урбаногема этого участка мы приняли в качестве условного внутригородского фона (УФ). Урбаногема участков № 1–4 по реакции среды относятся к градации «умеренно щелочных» почв: значения водного pH были достоверно (даже при доверительной вероятности 99%) больше по сравнению с УФ. Почва участка № 4 характеризовалась более щелочной реакцией среды (достоверной при доверительной вероятности 95%) по сравнению с придорожными газонами участков № 1 и 2.

Общий уровень засоления легкорастворимыми солями, оцениваемый по величине удельной электрической проводимости водной суспензии почвы (ЕС), был одинаковым для всех 4 исследуемых урбаногемов придорожных газонов: величина ЕС в среднем была равна 523 мкСм/см. Это значение в среднем превышает в 3,3 раза величину ЕС почвы центральной части сквера. Коэффициенты вариации этого показателя были значительными (42% в среднем) по всем пяти участкам.

Содержание водорастворимого натрия было ожидаемо минимальным в почве центральной части сквера (УФ) – 18 мг/кг, а максимальным – в урбаногемах всех газонов, окружающих этот сквер (участки № 2–4). Достоверных различий между величинами содержания натрия по этим трём участкам получено не было; среднее значение натрия составило 443 мг/кг, что в 24 раза превышает значение УФ. Содержание натрия в урбаногемах участка № 1 было в 3,4 раза меньше, чем на участках № 2–4 (достоверно при доверительной вероятности 99%), но в 7 раз больше, чем в УФ. Варьирование этого показателя по повторностям было высоким; в среднем по всем участкам коэффициент вариации составил 43%.

Характер изменения содержания водорастворимого хлора по разным участкам, в целом, был аналогичным натрию, однако различия между участками были ещё более контрастными. Среднее содержание хлора в урбаногемах всех трех газонов, окружающих сквер (участки № 2–4) составило 511 мг/кг, что почти в 80 раз больше, чем в УФ. Содержание хлора на участке № 1 (131 мг/кг) занимало промежуточное положение и было в 30 раз больше, чем в УФ. Коэффициент вариации для этого показателя по участкам № 1–4 был в среднем равен 52% и в два раза выше (103%) для участка № 5.

Характер изменения содержания водорастворимых сульфатов и фосфатов в урбаногемах по разным участкам существенно отличался по сравнению с натрием и хлором, наименьшие значения которых были получены в УФ. Содержание сульфатов в почве центральной части Первомайского сквера и всех окружающих его придорожных газонов было сравнительно небольшим и в среднем равно 12,4 мг S/kg, а в урбаногеме придорожного газона участка № 1 было выше почти в 7 раз. Варьирование этого показателя по повторностям было высоким для участков № 3–5 (52% в среднем) и экстремально высоким для участков № 1–2 (147% в среднем).

Содержание водорастворимых фосфатов в почве центральной части сквера было максимальным (7,8 мг P₂O₅/кг), что в 2,4 раза превышает средний уровень фосфатов в урбаногемах всех придорожных газонов (3,3 мг P₂O₅/кг). Различия в содержании этого показателя по участкам № 1–4 были статистически не достоверны. Средний по всем участкам коэффициент вариации значений водорастворимых фосфатов составил 91%.

Таблица 2

Вариационная статистика и дисперсионный анализ данных pH и содержания водорастворимых солей в изученных урбаногемах центральной части г. Новосибирска

№ участка	Древесные культуры на газонах	Среднее арифм.	НСР ₀₅	НСР ₀₁	SEM	SD	V, %	Медиана	Асимметрия	Экцесс
pH водный										
1	Берёза	8,05	bc	b	0,055	0,173	2,2	8,09	-0,21	-0,29
2	Липа	8,02	d	b	0,040	0,127	1,6	8,04	0,13	-1,28
3	Лиственница	8,21	cd	b	0,031	0,098	1,2	8,21	-0,53	0,94
4	Яблоня	8,26	d	b	0,051	0,162	2,0	8,20	0,24	-1,30
5	Сквер	7,75	a	a	0,117	0,370	4,8	7,86	-1,38	1,32
Удельная электрическая проводимость, мкСм/см										
1	Берёза	421	b	b	65,0	205,7	49	358	1,26	0,48
2	Липа	505	b	b	76,2	240,8	48	428	0,58	-1,14
3	Лиственница	566	b	b	46,3	146,5	26	519	1,13	0,45
4	Яблоня	601	b	b	87,1	275,6	46	584	0,53	-0,87
5	Сквер	158	a	a	20,9	66,2	42	132	1,60	1,41
Водорастворимый натрий, мг Na/кг										
1	Берёза	131	a	a	13,9	44,0	34	119	0,94	0,16
2	Липа	405	b	b	63,5	200,8	50	369	0,58	-0,70
3	Лиственница	443	b	b	47,4	150,0	34	407	0,93	0,49
4	Яблоня	482	b	b	80,7	255,1	53	444	0,61	-0,88
5	Сквер	18	a	a	2,8	8,8	47	16	1,31	0,22
Водорастворимый хлор, мг Cl/кг										
1	Берёза	193	a	ab	25,6	81,0	42	176	0,44	-0,66
2	Липа	524	b	bc	98,0	310,0	59	437	0,73	-0,59
3	Лиственница	611	b	c	78,3	247,5	41	518	0,94	-0,18
4	Яблоня	717	b	c	150,9	477,1	67	660	0,45	-1,10
5	Сквер	6	a	a	2,1	6,7	103	4	1,48	1,25
Водорастворимые сульфаты (SO ₄ ²⁻), мг S/кг										
1	Берёза	81,5	b	a	44,37	140,30	172	26,6	2,29	3,76
2	Липа	19,2	a	a	7,34	23,21	121	9,2	1,79	2,01
3	Лиственница	10,4	a	a	1,15	3,63	35	9,6	0,46	-1,06
4	Яблоня	9,5	a	a	1,33	4,21	44	8,1	1,16	0,03
5	Сквер	10,5	a	a	2,55	8,08	77	9,6	0,73	-0,72
Водорастворимые фосфаты (PO ₄ ²⁻), мг P ₂ O ₅ /кг										
1	Берёза	2,44	a	a	0,786	2,485	102	1,77	1,29	0,82
2	Липа	3,31	a	ab	1,016	3,214	97	1,80	1,19	0,16
3	Лиственница	3,97	a	ab	1,754	5,547	140	1,65	1,78	1,58
4	Яблоня	3,44	a	ab	0,495	1,565	46	2,87	0,56	-1,22
5	Сквер	7,82	b	b	1,781	5,632	72	8,93	0,15	-1,12

Примечание.

SEM – стандартная ошибка средней арифметической (ошибка репрезентативности), SD – среднее квадратическое (стандартное) отклонение, V – коэффициент вариации. Разные буквы в столбцах НСР₀₅ и НСР₀₁ означают, что различия между средними арифметическими превышают НСР при уровне значимости 0,05 и 0,01 (доверительной вероятности 95% и 99%, соответственно); а одинаковые буквы свидетельствуют об отсутствии достоверных различий.

В отличие от коэффициента вариации, оценивающего степень изменчивости данных внутри выборки (в нашем случае – между десятью повторностями для того или иного участка) или, другими словами, относительную величину разброса данных в выборке от их среднего значения, асимметрия и эксцесс представляют собой статистики, описывающие форму и степень симметричности распределения данных (их отклонение от нормального распределения). Величины коэффициентов асимметрии и эксцесса позволяют получить представление, насколько близка к нормальному (или другому) распределению не только выборочная, но и вся генеральная совокупность.

Коэффициенты асимметрии для пяти изученных химических свойств урбаноземов, кроме водного рН, были положительными и значительными по величине (превышали 0,50) для всех участков. Исключением был лишь низкий коэффициент асимметрии (0,15) для фосфатов участка № 5. Положительная величина коэффициента асимметрии указывает на наличие правосторонней асимметрии (правая ветвь относительно максимальной ординаты вытянута больше, чем левая), что указывает, что справа от центра распределения (моды/модальной вершины) расположено большее количество дат/значений, чем слева. При правосторонней асимметрии между показателями центра распределения существует соотношение: мода < медиана < среднее арифметическое (т.е. на кривой распределения левее расположена мода, далее медиана и правее – среднее арифметическое). Лишь для одного показателя (водный рН) получена отрицательная (левосторонняя) асимметрия для трех участков из пяти.

Эксцесс в статистике используется для описания формы распределения вероятностей; его величина указывает в какой степени значения данных группируются в центре (вблизи пика распределения) или хвостах (краевых участках). При положительных коэффициентах эксцесса форма кривой распределения имеет более острый пик и более тяжелые хвосты по сравнению с нормальным распределением, т.е. меньше значений данных находится рядом со средним значением и больше – на хвостах. При отрицательном коэффициенте эксцесса распределение имеет более плоский пик и более тонкие хвосты по сравнению с нормальным распределением, т.е. больше значений данных находится рядом со средним значением и меньше – на хвостах. В наших исследованиях значения коэффициента эксцесса ровно в половине случаев из 30 (6 показателей × 5 участков) были положительными и в другой половине – отрицательными. Какой-либо закономерности при этом не наблюдалось. Причем в большинстве случаев значения этого коэффициента по модулю были очень существенными (превышали 0,5) и даже достигали таких высоких значений как 3,8 (которое соответствовало самому большому коэффициенту вариации 172%). В связи с полученными высокими коэффициентами асимметрии и эксцесса будет целесообразным при оценке галохимического загрязнения повысить повторность отбора образцов урбаноземов с 10 до 15–20.

При изучении сезонной динамики загрязняющих веществ (содержащих натрия, хлор и другие) во многих исследованиях установлено, что концентрация фитотоксичных элементов в придорожных урбаноземах минимальна осенью и максимальна весной (Czerniawska-Kusza et al., 2004; Лысков, 2005; Якубов, 2006; Cunningham et al., 2008; Пироговская, Хмелевский, 2010). Это легко объяснить, поскольку ПГР применяются исключительно в зимний период, а в течение теплого периода года происходит их постепенное вымывание с осадками из верхнего корнеобитаемого слоя урбаноземов. В нашем случае почвенные образцы были отобраны в конце ноября. Это означает, что обнаруженные нами концентрации анализируемых показателей являются минимальными с точки зрения сезонной динамики этих показателей. Следовательно, полученные нами результаты свидетельствуют о значительном повышении содержания загрязняющих элементов в почвах придорожных газонов безусловно являются достоверными и не вызывают сомнений.

Как мы уже выше отмечали, хлорид натрия является основным компонентом ПГР «Бионорд Универсальный» и иных традиционных ПГР (см. табл. 1). Известно, что действие солей на изменение свойств почвы (в контексте их плодородия) напрямую зависит от их количества, ионного состава и их соотношения (что определяет тип засоления). При оценке солей по степени токсичности по десятибалльной шкале (1 балл – соли с наименьшей токсичностью и 10 баллов – с наибольшей) соли группируются следующим образом: Na_2SO_4 – 1 балл; NaHCO_3 – 3; MgSO_4 – 3–5; MgCl_2 – 3–5; NaCl – 5–6; Na_2CO_3 – 10 баллов (Манжина, 2021). Таким образом, в этом ряду хлорид натрия, за исключением карбоната натрия, является наиболее токсичным для растений соединением. В исследуемых нами урбаноземах, судя по рН (менее 9,0 ед.), накопление карбоната натрия (соды) не происходит и, следовательно, потенциальная фитотоксичность урбаноземов может быть обусловлена именно хлоридом натрия.

Хлорид натрия, наряду с другими потенциально токсичными солями, оказывает прямое и косвенное (через изменения ряда свойств почвы) действие на растения. Негативные последствия

внесения высоких доз хлорида натрия в почву заключаются в изменении ее физических и физико-химических свойств: происходит нарушение структуры почвы, разрушение ее агрегатного состава; смещается соотношение катионов в почвенном поглощающем комплексе (увеличивается относительная доля натрия), уровень рН сдвигается в сторону щелочной реакции, что дополнительно способствует диспергированию почвенных коллоидов, в результате чего затрудняется водный обмен почв (кроме почв песчаного и супесчаного гранулометрического состава) и возможность их промывания водой от избытка солей; а также затрудняется поглощение растениями азота и ряда других питательных элементов (включая фосфор), которые становятся менее мобильными в (слабо)щелочной среде (Зубкова и др., 2006; Шевченко и др., 2008; Cunningham et al., 2008; Пироговская, Хмелевский, 2010; Hofman et al., 2012; Руководство ..., 2017; Судник, Яковлев, 2021). Кроме того, повышенные концентрации солей в почве негативно действуют на активность почвенной микробиоты (Руководство ..., 2017; Судник, Яковлев, 2021), которая крайне разнообразна как по своему составу (в филогенетическом аспекте), так и по выполняемым функциям. Полагаем, что высокое содержание хлорида натрия приводит, как минимум, к ухудшению снабжения растений питательными веществами за счёт ингибирования деятельности гетеротрофной почвенной микробиоты, минерализующей почвенное органическое вещество, и фосфатсолобилизирующих бактерий, а также негативно влияет на деятельность эктомикоризных и эндомикоризных почвенных грибов, что особенно важно в нашем случае, поскольку на исследуемых придорожных газонах высажены древесные растения.

Что касается прямого воздействия высоких концентраций солей на растения, то можно выделить два механизма: осмотический и токсический.

Осмотический механизм. Вода поступает в растения из почвы благодаря явлению осмоса (всасывания или прохождения воды через клеточные мембраны корневой системы растений), для эффективного действия которого необходима некоторая разность давлений (или осмотических потенциалов). Повышенные концентрации солей в почве вызывают уменьшение этой разности, в результате чего растения страдают от недостатка воды, точно также, как и при засухе, даже при наличии в почве доступной растениям влаги. Затруднение поступления воды в растения приводит к потере тургора растительных клеток (особенно у тех видов, которые не способны регулировать свой водный потенциал) и неблагоприятным изменениям водно-солевого обмена в клетках и тканях растений. Кроме того, дефицит воды в тканях и избыток ионов, в основном Na^+ и Cl^- , негативно влияют на метаболизм растений, вызывая ионную токсичность и/или ионный дисбаланс в растительных тканях (Физиология ..., 2005; Marschner, 2011; Кулакова, Шабанова, 2019; Судник, Яковлев, 2021).

Механизм токсического действия обусловлен накоплением в клетках растений повышенных концентраций солей (вызывающих сильный окислительный, энергетический и др. стресс в фазу резистентности при сублетальных концентрациях солей) вплоть до гибели растений (при летальных концентрациях). Как мы отмечали выше, хлорид натрия среди других солей отличается повышенной фитотоксичностью, причём как за счёт ионов Na^+ , так и Cl^- . Высокое содержание токсичных ионов в клетках растений приводит к снижению устьичной проводимости листьев и, как следствие, ухудшению фотосинтеза и водного режима, разрушению пигментной системы; нарушению ультраструктуры клеток (в т.ч. происходят изменения в структуре хлоропластов); повреждению мембранных структур (вследствие чего возрастает ее проницаемость, теряется способность к избирательному поступлению веществ); затруднению ассимиляции таких необходимых для жизни растений катионов как калий и кальций; нарушению процессов обмена веществ (благодаря чему в клетках накапливается аммиак и другие токсины). Визуальное проявление токсичности можно наблюдать по образованиям на хвое и стеблях некрозов, замедлению роста побегов, преждевременному опадению листьев и хвои, усыханию и гибели деревьев и кустарников, изменению видового состава фитоценоза (Иванищев, 2019; Судник, Яковлев, 2021).

Многими исследователями установлено повышение содержания ионов натрия и хлора в урбаноземах придорожных территорий в пределах до 150 м от края проезжей части, что связано с применением противогололедных реагентов в холодное время года. При этом, по мере удаления от дорожного полотна на расстояние более 5–10 м отмечается резкое снижение содержания этих фитотоксичных ионов (особенно натрия) (Якубов, 2006; Cunningham et al., 2008; Пироговская, Хмелевский, 2010; Лыиков, 2017; Судник, Вознячук, 2020). На расстоянии 1–5 м от дорог выявлены повышенные значения содержания водорастворимого натрия в придорожных урбаноземах (в поверхностном слое до 10–25 см) самых разнообразных локаций: вблизи ряда автомагистралей между городами Республики Беларусь – в среднем 46 мг/кг в слое 0–10 см, коэффициент вариации (V) = 110% и 37 мг/кг в слое 10–20 см, V = 155% (Судник, Вознячук, 2020); вблизи ряда автомагистралей между городами США – 100–150 мг/кг (Cunningham et al., 2008); в г. Минске – 98–217 мг/кг (Пироговская,

Хмелевский, 2010); в г. Ополе, Польша – 132–330 мг/кг (Czerniawska-Kusza et al., 2004); в г. Туле – до 310 мг/кг (Осина и др., 2023); в придорожных сосновых насаждениях МКАД (г. Москва) – около 370 мг/кг (Лысиков, 2017); в пределах Западного административного округа г. Москвы: МКАД – в среднем 136 мг/кг, $V = 29\%$, крупные автомагистрали – 193 мг/кг, $V = 22\%$, внутрирайонная дорожная сеть – 166 мг/кг, $V = 25\%$ (Кошелева и др., 2018); в пределах Центрального и Юго-Восточного административных округов г. Москвы – в среднем 1044 мг/кг, $V = 33\%$ (Мальшева и др., 2018); в г. Москве – от 234 и до 1430 мг/кг (Изменения ..., 2022).

Аналогично натрию, повышенные значения содержания водорастворимого хлора обнаружены в различных урбаноземах (в поверхностном слое до 10–25 см) на расстоянии 1–5 м от дорог: вблизи ряда автомагистралей между городами Республики Беларусь – в среднем 58 мг/кг в слое 0–10 см, $V = 60\%$ и 51 мг/кг в слое 10–20 см, $V = 94\%$ (Судник, Вознячук, 2020); в г. Туле – до 220 мг/кг (Осина и др., 2023); в г. Минске – 122–273 мг/кг (Пироговская, Хмелевский, 2010); в г. Ополе, Польша – 120–480 мг/кг (Czerniawska-Kusza et al., 2004); в пределах Западного административного округа г. Москвы: МКАД – в среднем 88 мг/кг, $V = 47\%$, крупные автомагистрали – 117 мг/кг, $V = 38\%$, внутрирайонная дорожная сеть – 78 мг/кг, $V = 59\%$ (Кошелева и др., 2018); в пределах Центрального и Юго-Восточного административных округов г. Москвы – в среднем 975 мг/кг, коэффициент вариации – 30% (Мальшева и др., 2018); в придорожных сосновых насаждениях МКАД (г. Москва) – около 950 мг/кг (Лысиков, 2017).

Ряд вышеперечисленных данных приведён авторами соответствующих публикаций в расчёте на смоль(экв)/кг или ммоль(экв)/100 г почвы. Нами сделан пересчёт этих данных в мг/кг для удобства сравнения. По этой же причине мы пересчитали полученные нами данные из мг/кг в другие единицы, используемые различными исследователями (табл. 3).

Таблица 3

Среднее арифметическое содержание водорастворимых ионов в изученных урбаноземах центральной части г. Новосибирска

№ участка	Древесные культуры на газонах	Na ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	PO ₄ ²⁻	Анионы в сумме	SO ₄ ²⁻	PO ₄ ²⁻
		смоль(экв)/кг					мг/кг	
1	Берёза	0,57	0,54	0,255	0,0017	0,80	244,6	1,63
2	Липа	1,76	1,48	0,060	0,0023	1,54	57,7	2,22
3	Лиственница	1,93	1,72	0,032	0,0028	1,76	31,2	2,66
4	Яблоня	2,10	2,02	0,030	0,0024	2,05	28,7	2,30
5	Сквер	0,08	0,02	0,033	0,0055	0,06	31,6	5,23

Полученные нами величины содержания натрия и хлора в урбаноземах придорожных газонов (1–2 м от края дорожного полотна) 131–482 мг Na/кг и 193–717 мг Cl/кг находятся в пределах вышеприведённых данных, установленных другими исследователями. Интересно отметить, что в ряде случаев концентрация натрия превышает концентрацию хлора, иногда они равны (Мальшева и др., 2018), а иногда отмечается более чем двукратное превышение содержания хлора над натрием (Лысиков, 2017). Полагаем, что это зависит как от химического состава применяемых ПГР, так и времени отбора образцов для анализа, поскольку хлор легче вымывается из верхнего слоя урбаноземов с жидкими осадками тёплого периода. В наших исследованиях концентрация хлора в урбаноземах была на 30–50% выше концентрации натрия.

К сожалению, в настоящее время отсутствуют гигиенические нормативы по допустимым концентрациям водорастворимых форм натрия, хлоридов и сульфатов для оценки степени загрязнения ими почв (Пироговская, Хмелевский, 2010). Однако, учитывая важность знания критического уровня содержания фитотоксичных элементов в почве, ряд исследователей предлагает использовать хотя бы их оценочные величины.

На примере липы мелколистной (*Tilia cordata* L.) I. Czerniawska-Kusza с соавторами (2004) установили, что симптомы солевого повреждения (хлороз и некроз края листовых пластинок) проявляются при концентрации в почве водорастворимых натрия и хлора в количествах 132 мг/кг и 39 мг/кг, соответственно, а содержание 260 мг Na/кг и 120 мг Cl/кг вызывает уже обширный некроз листьев и дефолиацию. А.Б. Лысиков (2017), ссылаясь на две публикации, приводит допустимые

величины содержания натрия в корнеобитаемом слое почвы 260 мг/кг (Состояние ..., 2004), а хлора – 200 мг/кг (Серебряноборское ..., 2010). Е.А. Сидорович с соавторами (2004) отмечает, что «порог токсичности», то есть предельное содержание хлора в почве, выше которого начинается угнетение роста и развития растений, составляет 100 мг/кг почвы. На примере яровых зерновых культур установлено, что визуальными диагностируемыми признаками угнетения растений и снижение продуктивности на 30–35% проявляются при содержании водорастворимого натрия в почве 250–300 мг/кг, а хлор вызывает существенное снижение (на 20–28%) продуктивности растений при его концентрациях в почве 350–400 мг/кг (Головатый и др., 2008). При изучении влияния ПГР на различных площадках в г. Москва вблизи основных трасс было предложено ранжировать урбаноземы по содержанию ионов натрия на три группы: с низким содержанием 46–161 мг/кг, со средним – 552–667 мг/кг, с высоким – 1035–1564 мг/кг (Изменения ..., 2022). Очевидно, что применение ПГР в г. Москве имеет более длительную историю (и ПГР вносили в большем количестве) по сравнению с другими российскими городами. В утверждённом постановлении Правительства г. Москвы от 27.07.2004 г. № 514-ПП «О повышении качества почвогрунтов в городе Москве» приводится величина содержания хлоридов 1680 мг/кг в качестве «норматива» (Доклад ..., 2018), который, вероятно, следует понимать, как «критическая концентрация». В том же документе отмечено, что ориентировочно допустимая концентрация (ОДК) для хлора составляет 100 мг/кг (Доклад ..., 2018). В.Г. Петров с соавторами (2019) подошёл к расчёту предельно допустимой концентрации (ПДК) хлора через опубликованную ПДК для KCl, равную 360 мг/кг (Предельно ..., 2006). Однако авторы не учли, что указанная величина рассчитана по K₂O. Учитывая это, ПДК для хлора составляет 135,5 мг/кг, а не 171,5 мг/кг, как приведено в статье (Петров и др., 2019).

Таким образом, в опубликованных работах приводятся довольно различающиеся величины критических содержаний водорастворимых натрия и хлора в почве, при которых происходит угнетение жизнедеятельности растений. Анализ литературных данных позволяет нам сделать экспертную оценку, что таким критическим уровням соответствуют значения 300 мг/кг для натрия и 200 мг/кг для хлора. Учитывая эти значения, обнаруженные нами концентрации обоих фитотоксичных ионов (натрия и хлора) в придорожных урбаноземах всех трех участков, окружающих Первомайский сквер, превышают соответствующие критические уровни. В урбаноземах участка № 1 (в начале Красного проспекта) содержание натрия ниже критического уровня, а хлора – практически равно ему.

Отметим, что между концентрациями водорастворимых натрия и хлора в исследуемых нами урбаноземах ($n = 50$) получена положительная корреляционная связь с очень высоким (0,96) коэффициентом корреляции (табл. 4). Достоверная корреляционная взаимозависимость содержания натрия с хлором в почве, а также со степенью повреждения растений была установлена многими исследователями (Цит. по: Czerniawska-Kusza et al., 2004).

Таблица 4

Матрица парных корреляций Пирсона химических свойств изученных урбаноземов

Показатели	pH	Na ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	PO ₄ ²⁻
ЕС	0,21	0,87	0,90	0,31	-0,18
pH		0,35	0,30	-0,20	-0,09
Na ⁺			0,96	-0,10	-0,15
Cl ⁻				-0,08	-0,07
SO ₄ ²⁻					-0,17

Примечание.

Пороги достоверности коэффициентов корреляции (R) при доверительной вероятности 95% и 99% равны 0,279 и 0,361 соответственно. Жирным выделены статистически значимые величины.

Зависимость содержания хлора от натрия для наших экспериментальных данных описывается простым уравнением линейной регрессии: $Cl = 1,503 \times Na - 34,655$ (где концентрации Cl и Na представлены в мг/кг) с коэффициентом детерминации 0,92 (рис. 1), т.е. варьирование содержания хлора в урбаноземах на 92% определяется содержанием натрия и наоборот.

Содержание и натрия, и хлора достоверно коррелировало с удельной электропроводностью водных суспензий почв (ЕС): коэффициенты корреляции были соответственно равны 0,87 и 0,90 (табл. 4), а коэффициенты детерминации – 0,76 и 0,81, соответственно. Это закономерно, поскольку электропроводность напрямую зависит от общей концентрации ионов, переходящих в водную

вытяжку и, поэтому, характеризует общее количество легкорастворимых солей. Это показывает, что роль других ионов (кроме натрия и хлора) в составе водорастворимых солей незначительна. На это же указывает отсутствие достоверной зависимости между ЕС и фосфат-анионами, слабая корреляционная связь ЕС и сульфат-анионами (см. табл. 4). На рисунке 2 представлена линия регрессии зависимости содержания натрия от ЕС, описываемая линейным уравнением $Na = 0,846 \times EC - 85,262$ (где концентрация Na представлена в мг/кг, а ЕС – в мкСм/см).

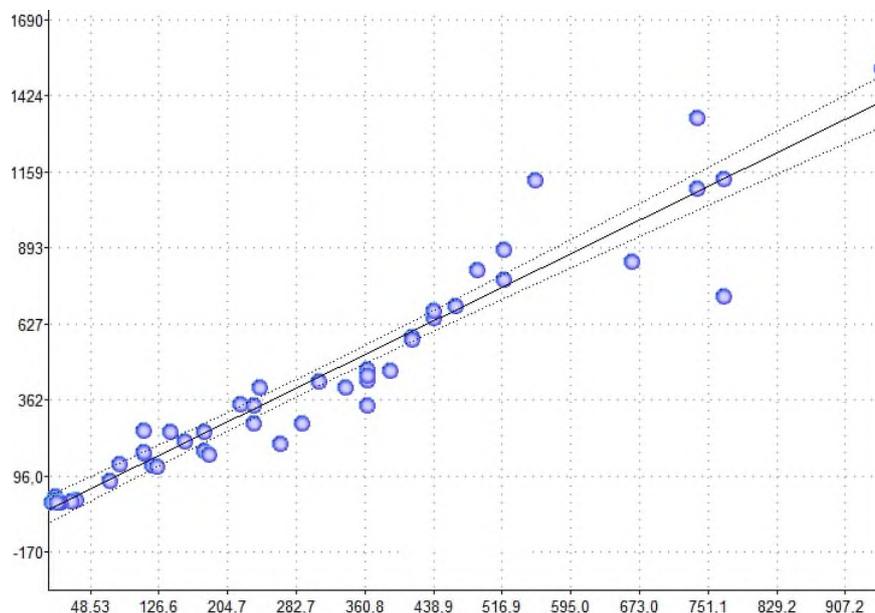


Рисунок 1. Регрессионная зависимость содержания водорастворимого хлора (мг/кг) от содержания водорастворимого натрия (мг/кг): $Cl = 1,503 \times Na - 34,655$ ($R^2 = 0,92$).

Полученные значения ЕС в урбаноземах всех четырёх придорожных газонов достоверно не различались между собой и в среднем были равны 523 мкСм/см. Для ЕС, при её определении по ГОСТ 26423-85 (т.е. соотношении почва : раствор = 1 : 5), отсутствуют градации степени засоленности почвы. В литературе имеется шкала/градация засоленности почв, определенной при соотношении почва : раствор 1 : 2, применительно к потенциальным рискам выращивания деревьев и кустарников (Scianna et al., 2007). В соответствии с этой шкалой почва с величиной ЕС 500-1000 мкСм/см соответствует градации «умеренно засоленная» с «высоким» потенциальным риском выращивания деревьев и кустарников, а с величиной ЕС > 1000 мкСм/см соответствует градации «сильно засоленная» с «экстремально высоким» потенциальным риском выращивания деревьев и кустарников. Однако, поскольку мы использовали разведение почва : раствор, равное 1 : 5, то можно с уверенностью допустить, что значения ЕС, соответствующие вышеприведённым градациям сместятся в сторону более низких значений. Таким образом, мы полагаем, что засоленность изученных придорожных урбаноземов (участки № 1–4) находится на границе градаций «умеренно засоленная» и «сильно засоленная» и, соответственно, с «высоким» «экстремально высоким» потенциальным риском выращивания деревьев и кустарников.

Актуальную кислотность/щёлочность почвы оценивали по величине водного рН. Наиболее распространёнными зональными почвами, окружающими г. Новосибирск, являются серые лесные и чернозёмы выщелоченные/оподзоленные со средней величиной водного рН 6,6 (Хмелев, Танасиенко, 2009), которую можно принять как естественное/природное фоновое значение. Полученные нами величины рН для центральной части Первомайского сквера варьируют по повторностям в пределах от 6,9 до 8,1 со средним арифметическим 7,7, что на 1,0 ед. рН превышает фоновое значение. Таким образом, даже внутренняя часть сквера характеризуется изменёнными физико-химическими свойствами почв (т.е. является антропогенно преобразованной), что подтверждает правильность определения этой почвы как «урбанозем». По сравнению со слабощелочной реакцией среды почв центральной части сквера, придорожные газоны соответствуют градации «умеренно щелочных почв». Причём в урбаноземах участков № 1 и 2 превышение величины рН по сравнению с фоновой почвой составило 1,3 ед., а участков № 3 и 4 – 1,5, а по сравнению с центральной частью сквера – 0,3–0,5 ед.

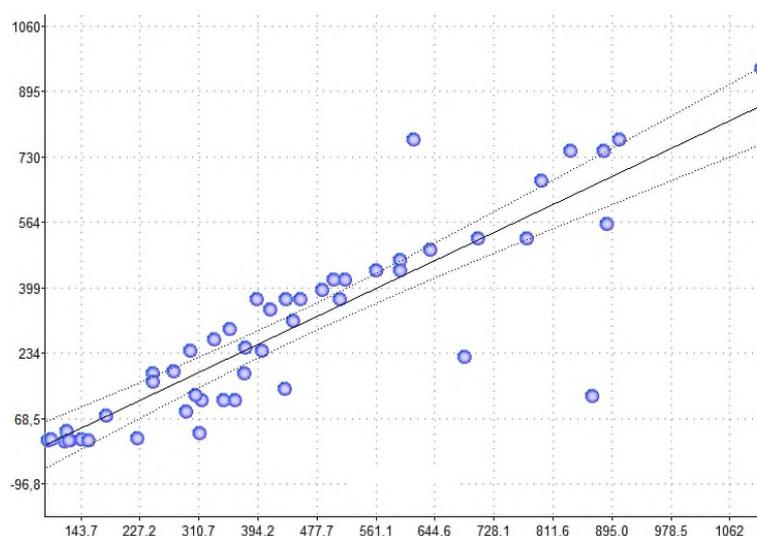


Рисунок 2. Регрессионная зависимость содержания водорастворимого натрия (мг/кг) от удельной электрической проводимости (ЕС, мкСм/см): $Na = 0,846 \times EC - 85,262$ ($R^2 = 0,76$).

Наши выводы о подщелачивании городских и, особенно, придорожных почв, подвергающихся прямому действию ПГР, совпадают с результатами многих исследований в крупных городах. При сравнении реакции среды придорожных почв трех автомобильных дорог (с интенсивным движением) г. Москвы с прилегающими внутригородскими лесопарковыми массивами, получено повышение величины водного рН в среднем на 0,6 ед. (Кулакова, Шабанова, 2019). По сравнению с фоновой (незагрязненной) почвой вблизи г. Москвы, различные исследователи отмечают повышение величины водного рН на 1,2–1,7 ед. в придорожных почвах Западного административного округа при использовании ПГР (Кошелева и др., 2018); на 1,4 ед. в почвах внутригородских лесопарковых массивов и на 2,3 ед. в почвах придорожных газонов Центрального и Юго-Восточного административных округов (Малышева и др., 2018); на 1,8–3,4 ед. в придорожных газонах г. Москвы в связи с применением ПГР (Изменения ..., 2022).

В наших исследованиях между водным рН и содержанием водорастворимых натрия и хлора была получена положительная корреляционная связь, но только при 95% доверительной вероятности: коэффициенты корреляции были соответственно равны 0,35 и 0,30. Зависимость содержания натрия от водного рН описывается простым уравнением линейной регрессии $Na = 314,6 \times pH - 2239,0$ (где концентрация Na представлена в мг/кг, а водный рН – в единицах рН) (рис. 3). При этом коэффициент детерминации, хотя и достоверен (при 95% доверительной вероятности), но представляет собой незначительную величину (0,12).

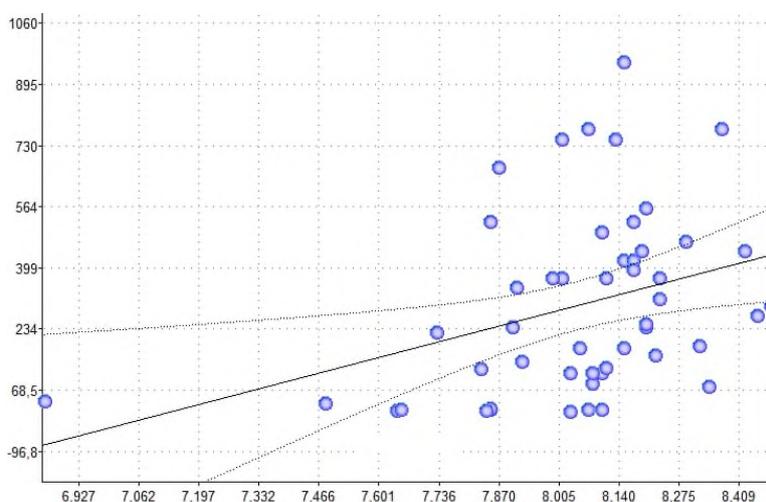


Рисунок 3. Регрессионная зависимость содержания водорастворимого натрия (мг/кг) от водного рН: $Na = 314,6 \times pH - 2239,0$ ($R^2 = 0,12$).

Содержание водорастворимых сульфатов в урбаноземах всех придорожных газонов, окружающих Первомайский сквер, и в центральной части этого сквера было одинаковым (достоверные различия отсутствовали) и в среднем составило 12,4 мг S/kg. В придорожном газоне начала Красного проспекта (участок № 1) содержание сульфатов было почти в 7 раз выше. В связи с отсутствием данных по истории использования этих участков г. Новосибирска в прошлом, интерпретировать такую большую разницу в содержании сульфатов нам не представляется возможным.

Наиболее часто встречаемая величина содержания сульфатов в городских почвах Республики Беларусь варьирует в пределах 35–70 мг/kg (Хомич и др., 2004). В наших исследованиях для участков № 2–5 содержание сульфатов находилось практически в том же диапазоне: 29–58 мг SO₄/kg (см. табл. 3). Ряд исследователей, изучавших сульфаты в урбаноземах г. Минска, не обнаружили явно выраженной зависимости между содержанием сульфатов и дистанцией (удалённостью) от дорожных покрытий, а также сезонностью и годом наблюдения (Пироговская, Хмелевский, 2010). В Центральном и Юго-Восточном административном округах г. Москвы содержание сульфатов в урбаноземах парков и скверов находилось в диапазоне 490–989 мг SO₄/kg (710 мг SO₄/kg в среднем), а в урбаноземах придорожных газонов было несколько выше – 682–1334 мг SO₄/kg (922 мг SO₄/kg в среднем) (Мальшева и др., 2018). Эти значения существенно превышают обнаруженное нами в г. Новосибирске максимальное содержание сульфатов на участке № 1 – 245 мг SO₄/kg.

Гигиенические нормативы для водорастворимой сульфатной серы отсутствуют, но приводятся данные о ПДК для валового содержания серы и серной кислоты (в пересчёте на серу) в почве – 160 мг/kg (Предельно ..., 2006). В фоновых (незагрязнённых) почвах вблизи г. Новосибирска – черноземах выщелоченных глинисто-иллювиальных, содержание валовой серы обычно варьирует в пределах 300–400 мг/kg. Поэтому использовать опубликованный/утверждённый ПДК на серу (Предельно ..., 2006) для оценки степени загрязнения почвы водорастворимыми (потенциально фитотоксичными в повышенных количествах) сульфатами не представляется возможным.

Содержание сульфатов в наших исследованиях слабо коррелирует (при 95% доверительной вероятности) с удельной электропроводностью водной суспензии почвы ($R = 0,31$); с другими показателями достоверной связи получено не было.

Содержание водорастворимых фосфатов в исследуемых урбаноземах было, в целом, очень высоким по сравнению с агрогенными почвами сельскохозяйственных экосистем Новосибирской области. В урбаноземах всех придорожных газонов (участки № 1–4) содержание фосфатов в среднем составило 2,2 мг PO₄/kg (табл. 3), что в пересчёте равно 3,3 мг P₂O₅/kg (табл. 2). Достоверных различий в содержании фосфатов между этими участками получено не было. Зато, в почве центральной части Первомайского сквера содержание фосфатов было в 2,4 раза выше, что вероятно обусловлено ненормированным предшествующим внесением повышенных доз фосфорных удобрений под древесные насаждения в сквере. Содержание фосфатов достоверно не коррелировало ни с одним другим анализируемым показателем свойств почвы.

При расчете зависимости суммы четырех анализируемых ионов (Na⁺, Cl⁻, SO₄²⁻ и PO₄²⁻), выраженных в смоль(экв)/kg, от удельной электропроводности (ЕС) получено уравнение линейной регрессии $SI = 0,0078 \times EC - 0,985$ (где SI (сумма ионов) представлена в смоль(экв)/kg, а ЕС – в мкСм/см). Зависимость между ЕС и суммой ионов была несколько более тесная ($R^2 = 0,87$), чем с отдельно натрием ($R^2 = 0,76$) или с хлором ($R^2 = 0,81$).

Полученные нами экспериментальные данные были обработаны методом главных компонент. Этот метод представляет собой технологию многомерного статистического анализа, используемую для сокращения размерности пространства признаков с минимальной потерей полезной информации. Другими словами, это один из основных способов уменьшить размерность данных, потеряв наименьшее количество информации. С математической точки зрения метод главных компонент представляет собой ортогональное линейное преобразование, которое отображает данные из исходного пространства признаков (переменных) в новое пространство меньшей размерности. При этом первая ось новой системы координат строится таким образом, чтобы дисперсия данных вдоль неё была максимальна (т.е. «брала на себя» максимальную дисперсию). Вторая ось строится ортогонально первой так, чтобы дисперсия данных вдоль неё, была максимальной из оставшихся возможных (т.е. «вытаскивала» оставшуюся после 1-ой максимальную дисперсию). Первая ось называется первой главной компонентой, вторая – второй главной компонентой. Чем ближе расположены точки (переменные/признаки или образцы/повторности, или и те, и другие) в плоскости главных компонент, тем ближе между ними связь.

Анализ данных методом главных компонент наглядно демонстрирует, что два участка из пяти существенно отличаются от остальных. Точки/повторности участка №5 (центральная часть Первомайского сквера) расположены обособленно и занимают квадрат с координатами между +1,0 и +1,5 на оси 1-ой главной компоненты и между 0,0 и -1,0 на оси 2-ой главной компоненты (рис. 4). Точки/повторности участка № 1 (начало Красного проспекта) также расположены на положительной части оси 1-ой главной компоненты, но вблизи значения +0,5 и около значения 0,0 по оси 2-ой главной компоненты. На плоскости двух первых компонент (рис. 4) мы объединили соответствующие выборки (исключив по два выброса из каждой выборки) овалами разного цвета для повышения наглядности представления полученных результатов этим методом статистического анализа.

Для трех других участков большая часть точек/повторностей расположена в отрицательной части оси 1-ой главной компоненты. Более «кучно» расположены точки/повторности для участка № 3 (придорожный газон у Первомайского сквера вдоль ул. Максима Горького). Для участков № 2 и № 4 (придорожные газоны у Первомайского сквера вдоль Красного проспекта и ул. Советской, соответственно) характерен гораздо больший разброс на плоскости главных компонент: от -2,0 до +0,5 по оси 1-ой главной компоненты и от -1,0 до +1,0 по оси 2-ой главной компоненты (рис. 4).

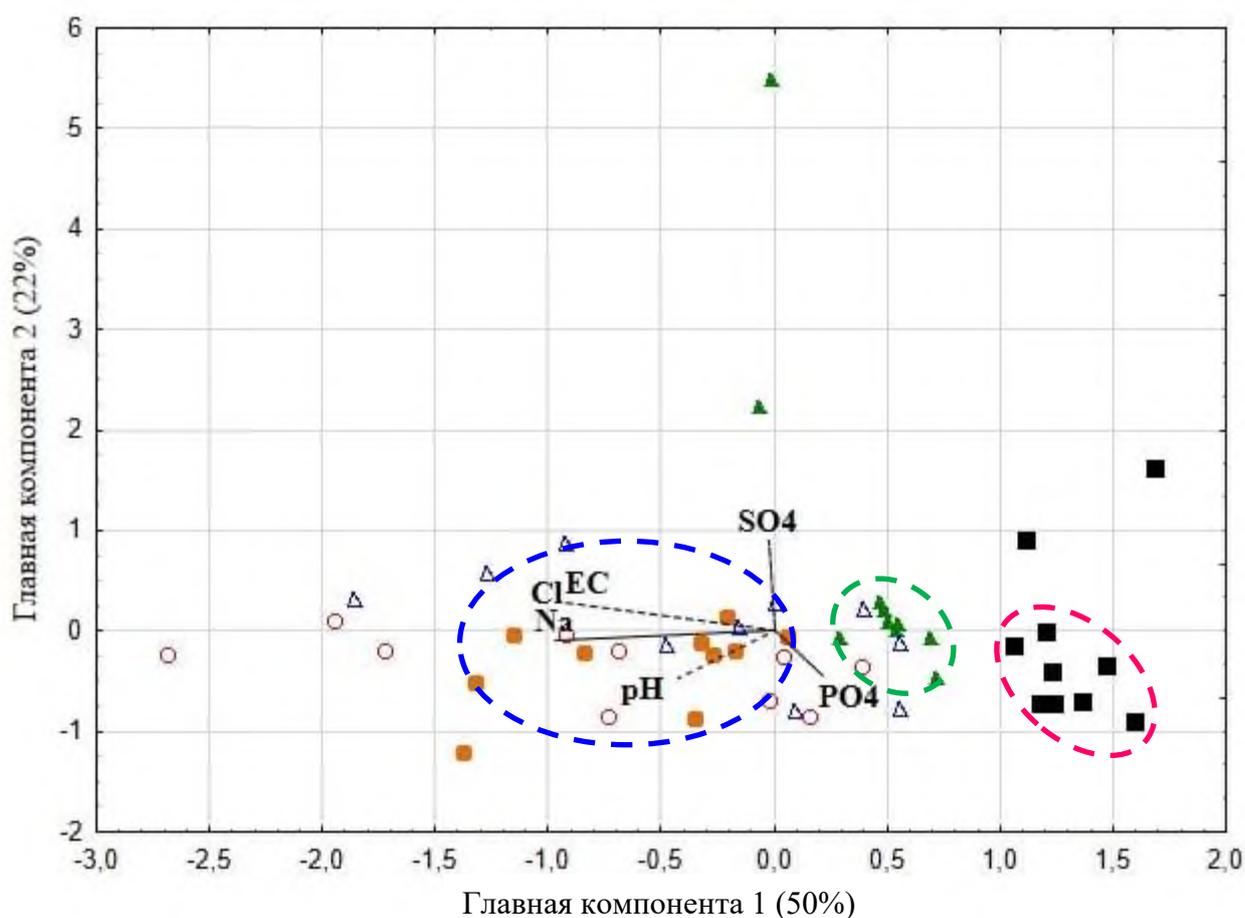


Рисунок 4. Расположение объектов (образцы урбаноземов в 10-кратной повторности с 5 участков) и измеряемых показателей в плоскости двух первых главных компонент.

▲ - Участок № 1; ▲ - Участок № 2; ● - Участок № 3; ○ - Участок № 4; ■ - Участок № 5.

Таким образом, несмотря на различную глубину отбора образцов урбаноземов участков № 2–4 (всех трех придорожных газонов у Первомайского сквера) и даже их визуальное отличие (по гранулометрическому составу, структуре, содержанию органического вещества) метод главных компонент выявил их сходство, что вероятно обусловлено одинаковыми по времени и дозам обработками ПГР дорожного полотна вдоль всех трех участков, в связи с чем почвы этих придорожных газонов получили одинаковое количество загрязняющих фитотоксичных элементов, входящих в состав данного ПГР.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основной целью проведённой работы было оценить влияние применения натрий- и хлорсодержащих противогололёдных реагентов (ПГР) на загрязнение почв придорожных газонов в центральной части г. Новосибирска. Поскольку у нас отсутствуют достоверные сведения о количестве и разновидностях вносимых ПГР в пределах исследуемой территории в последние годы, мы не можем с уверенностью вычленить влияние ПГР «Бионорд» среди других ПГР. Однако, учитывая, что химический состав применяемых ПГР относительно однороден (включает преимущественно ионы Cl и Na), то сделанные нами выводы об изменениях химических и физико-химических свойств урбаноземов под влиянием ПГР, следует отнести в целом к противогололёдным реагентам, основным действующим веществом которых является хлорид натрия.

Применение ПГР на центральных улицах г. Новосибирска привело к небольшому, но достоверному повышению величин водного pH почвы придорожных газонов до градации «умеренно щелочные», по сравнению с почвой центральной части Первомайского сквера, реакция среды которой соответствует градации «слабощелочные».

Значительно больший негативный эффект от использования ПГР был получен для удельной электрической проводимости водной суспензии почв (ЕС), характеризующей общий уровень их засоления легкорастворимыми солями. Среднее значение ЕС (523 мкСм/см) для урбаноземов придорожных газонов (участки № 1–4) в 3,3 раза превышало величину ЕС почвы центральной части сквера (участок № 5). С помощью простых уравнений линейной регрессии через ЕС можно корректно и с высокой достоверностью рассчитать содержание в урбаноземах натрия ($R^2 = 0,76$), хлора ($R^2 = 0,81$) и суммы четырех ионов (Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} и PO_4^{2-}), выраженных в смоль(экв)/кг ($R^2 = 0,87$).

Возможно, вследствие разных дозировок применения ПГР на улицах г. Новосибирска, содержание водорастворимого натрия в урбаноземе придорожного газона, расположенного в начале Красного проспекта (участок № 1), было в среднем в 3,4 раза меньше, чем в урбаноземах трех придорожных газонов, окружающих Первомайский сквер (участки № 2–4). По сравнению с центральной частью этого сквера (участок № 5), содержание водорастворимого натрия в урбаноземе участка № 1 было выше в 7 раз, а на участках № 2–4 – в среднем в 24 раза.

Ещё более контрастные различия от внесения ПГР проявляются при анализе содержания водорастворимого хлора на разных участках. Среднее содержание хлора в урбаноземах всех трех газонов, окружающих Первомайский сквер (участки № 2–4), составило 511 мг/кг, что почти в 80 раз больше, чем в центральной части этого сквера. Содержание хлора в урбаноземах участка № 1 (131 мг/кг) занимало промежуточное положение и было в 30 раз больше, чем в центре сквера.

Содержание водорастворимых сульфатов и фосфатов в урбаноземах г. Новосибирска не зависело от применения ПГР «Бионорд» или иных ПГР.

Благодаря установленной высокой зависимости содержания водорастворимых форм фитотоксичных катионов и анионов (прежде всего Na и Cl) от удельной электрической проводимости водной суспензии почвы (ЕС), в дальнейшем, для «грубой» оценки галохимического загрязнения урбаноземов можно ограничиваться их анализом только на показатель ЕС.

Для уточнения степени загрязнения урбаноземов (в рамках планового мониторинга) предлагаем определять содержание водорастворимого хлора, поскольку этот показатель (1) очень тесно коррелирует с водорастворимым натрием (с коэффициентом корреляции 0,96), т.е. дополнительное определение натрия не требуется; (2) является более контрастным по сравнению с натрием (т.е. позволяет выявить более «тонкие» различия в уровне загрязнения между отдельными локациями); (3) дешевле при анализе потенциометрическим способом с хлорид-селективным электродом, по сравнению с определением натрия на пламенном фотометре или атомно-абсорбционном спектрометре. Отметим, что этот полученный нами вывод справедлив в случае позднесеннего отбора образцов урбаноземов. При других сроках отбора образцов (весной или летом) необходимо проведение дополнительных исследований из-за высокой мобильности хлора в почве, обеспечивающей его нисходящую миграцию вплоть до полного выщелачивания за пределы корнеобитаемого слоя.

В связи с полученными высокими коэффициентами асимметрии и эксцесса (более 0,5) рекомендуем при оценке галохимического загрязнения выполнять отбор образцов урбаноземов в 15–20-кратной повторности.

В целях снижения негативного воздействия соледержащих ПГР на свойства урбаноземов рекомендуем проведение гипсования, благодаря которому происходит насыщение почвенно-поглощающего комплекса кальцием и, соответственно, снижается относительная доля обменного натрия, что приводит к улучшению физических и физико-химических свойств урбаноземов.

Дополнительным рекультивационным мероприятием для урбаноземов с высокими концентрациями хлора и натрия является внесение мелиорантов с высоким содержанием органического вещества, причём как легкоразлагаемой его фракции для активизации микробиологических процессов в почве, так и труднорастворимой для улучшения ее структуры.

В весенний период после снеготаяния рекомендуем осуществлять обмыв крон и обильный полив для ускорения промывания корнеобитаемого слоя урбаноземов от легкорастворимых ионов натрия и хлора.

Оптимальным вариантом решения проблемы успешного сохранения зелёных насаждений г. Новосибирска при галохимическом загрязнении урбаноземов является сочетание трех составляющих: (1) постоянный мониторинг уровня загрязнения городских почв; (2) проведение вышеуказанных рекультивационных мероприятий; (3) использование для озеленения ассортимента местных и интродуцированных видов деревьев и кустарников (способных выдерживать погодные условия г. Новосибирска), отличающихся повышенной толерантностью к загрязнению натрий- и хлорсодержащими солями.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают глубокую признательность инженеру лаборатории агрохимии Института почвоведения и агрохимии СО РАН Крыловой А.А. за помощь в выполнении анализов почвенных образцов и оформлении рукописи настоящей статьи.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа была выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект № 121031700309-1) и частично за счёт Договора № 182/12-2023 на проведение анализа почвенных образцов с целью оценки влияния применения хлорсодержащих препаратов на дорожных покрытиях на загрязнение почв между Муниципальным автономным учреждением города Новосибирска «Горзеленхоз» и ИПА СО РАН.

ЛИТЕРАТУРА

Водянова М.А., Крятов И.А., Донерьян Л.Г., Евсеева И.С., Ушаков Д.И., Сбитнев А.В. Эколого-гигиеническая оценка качества почв урбанизированных территорий // Гигиена и санитария. 2016. Том 95. № 10. С. 913–916. <http://dx.doi.org/10.18821/0016-9900-2016-95-10-913-916>

Головатый С.Е., Ковалевич З.С., Лукашенко Н.К., Вишняков Р.В. Пространственное распределение химических загрязнителей в почвах территорий, прилегающих к предприятиям ПО «Беларуськалий». Сообщение 2. Натрий // Почвоведение и агрохимия. 2008. № 2 (41) С. 244–255.

Доклад «О состоянии окружающей среды в городе Москве в 2017 году». Под ред. А.О. Кульбачевского. Москва: ДПиООС, 2018. 358 с.

Зубкова Т.А., Манучарова А.С., Черноморченко Н.И., Костарев И.А. Влияние легкорастворимых солей на структурные свойства минеральных систем // Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение. 2006. № 2. С. 20–25.

Иванищев В.В. О механизмах солеустойчивости растений и специфике влияния засоления // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. 2019. № 4. С. 76–88.

Изменения химических характеристик почв Москвы с применением противогололедных реагентов. ФБУН «Федеральный научный центр медико-профилактических технологий управления рисками здоровью населения». 26.05.2022. [Электронный ресурс]. URL: <https://fcrisk.ru/forums/node/1161> (дата обращения 13.02.2024).

Классификация и диагностика почв России / Авторы и составители: Л.Л. Шишов, В.Д. Тонконогов, И.И. Лебедева, М.И. Герасимова. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.

Кошелева Н.Е., Дорохова М.Ф., Кузьминская Н.Ю., Рыжов А.В., Касимов Н.С. Влияние автотранспорта на экологическое состояние почв в западном административном округе Москвы // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2018. № 2. С. 16–27.

Крятов И.А. Тонкопий Н.И., Водянова М.А., Русаков Н.В., Донерьян Л.Г., Евсеева И.С., Ушаков Д.И., Матвеева И.С., Воробьева О.В., Цапкова Н.Н. Методические подходы к обоснованию гигиенических требований к применению противогололедных материалов // Гигиена и санитария. 2014. Том 93. № 6. С. 52–54.

Кулакова Н.Ю., Шабанова Н.П. Засоление почв – одна из проблем городского озеленения // Актуальные проблемы лесного комплекса: сборник материалов конференции. 2019. № 54. С. 127–131.

- Лопатина Т.С., Александрова Ю.В., Анищенко О.В., Грибовская И.В., Оськина Н.А., Зотина Т.А., Задерев Е.С. Влияние растворов противогололедной смеси на *Moina macroscopa* и *Allium* сера в биотестовом эксперименте // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2020. № 51. С. 162–178. <http://doi.org/10.17223/19988591/51/9>
- Лысыков А.Б. Динамика загрязнения почв сосновых насаждений в зоне Московской кольцевой автодороги // Лесоведение. 2005. № 5. С. 18–24.
- Лысыков А.Б. Влияние противогололедных реагентов на состояние почвы придорожных сосняков Серебряноборского опытного лесничества // Лесоведение. 2017. № 6. С. 446–451. <http://doi.org/10.7868/S0024114817060079>
- Мальшева А.Г., Шелепова О.В., Водянова М.А., Донерьян Л.Г., Ушакова О. В., Юдин С.М. Эколого-гигиенические проблемы применения противогололедных реагентов в условиях крупного мегаполиса (на примере территории города Москвы) // Гигиена и санитария. 2018. Том 97. № 11. С. 1032–1037. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2018-97-11-1032-37>
- Манжина С.А. К вопросу выявления химизма и степени засоления почв: российские и зарубежные практики // Мелиорация и гидротехника. 2021. Том 11. № 3. С. 163–181. <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2021-11-3-163-181>
- Наместникова О.В., Бузаева М.В. Мониторинг засоления почв в системе обеспечения экологической безопасности крупного города // Современные проблемы гражданской защиты. 2019. № 1 (30). С. 44–52.
- Никифорова Е.М., Кошелева Н.Е., Хайбрахманов Т.С. Экологические последствия применения противогололедных реагентов для почв восточного округа Москвы // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2016. № 3. С. 40–49.
- Николаев Ю.Н., Шестакова Т.В., Бычкова А.Ю., Маркова Ю.Л., Лубкова Т.Н. Яникиева О.Е. Солевое загрязнение почв и растительности в НП «Лосиный остров» // Новые идеи в науках о Земле. Тезисы докладов V Международной конференции. 2001. Том 4. С. 44–54.
- Осина К.В., Арляпов В.А., Горелова С.В. Анионно-катионный состав почв урбанизированных экосистем тульской области // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2023. № 1. С. 24–37.
- Петров В.Г., Ханнанов Д.А., Балицкий Я.А. Подвижность хлорид-ионов в дерново-подзолистой почве при загрязнении хлоридами щелочных металлов // Химическая физика и мезоскопия. 2019. Том 21. № 2. С. 290–295. <https://doi.org/10.15350/17270529.2019.2.31>
- Пироговская Г.В., Хмелевский С.С. Содержание натрия, хлоридов и сульфатов в почвах г. Минска // Почвоведение и агрохимия. 2010. № 1. С. 243–254.
- Полевой определитель почв. Москва: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 2008. 182 с.
- Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве: Гигиенические нормативы, ГН 2.1.7.2041–06. Москва: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2006. 15 с.
- Противогололедные материалы «Бионорд» (СТО 001-80119761-2010). Уральский завод противогололедных материалов. Пермь, 2016. 29 с. URL: https://bionord.store/upload/iblock/f42/_-_-_-_-_-2018_19.pdf (дата обращения 07.03.2024).
- Руководство по управлению засоленными почвами / Под редакцией Р. Варгаса, Е.И. Панковой, С.А. Балюка, П.В. Красильникова, Г.М. Хасанхановой. ФАО, Рим, 2017. 153 с.
- Серебряноборское опытное лесничество: 65 лет лесного мониторинга. Москва: Товарищество научных изданий КМК, 2010. 260 с.
- Сидорович Е.А., Арабей Н.М., Кирковский К.К. и др. Аккумуляция ионов хлора почвами и ассимиляционными органами деревьев в городских насаждениях Минска // Проблемы озеленения городов: альманах. Москва: Прима-М, 2004. Выпуск 10. С. 203–207.
- Состояние зеленых насаждений в Москве (по данным мониторинга 2003 г.) / Под ред. Х.Г. Якубова. Москва: Прима-М, 2004. 224 с.
- Судник А.В., Вознячук И.П. Последствия воздействия загрязнения придорожных территорий компонентами солевых реагентов на экологическое состояние почвы и растений в лесных биогеоценозах // Лесной вестник. 2020. Том 24. № 6. С. 83–95. <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2020-6-83-95>
- Судник А.В., Яковлев А.П. О последствиях применения в качестве противогололедного реагента хлорида натрия на состояние насаждений вдоль улиц и дорог в г. Минске // Актуальные проблемы изучения и сохранения фито- и микобиоты. Минск: БГУ, 2021. С. 205–209.
- Теория и практика химического анализа почв / Под редакцией Л.А. Воробьевой. Москва: ГЕОС, 2006. 400 с.

- Физиология растений: Учебник для студ. вузов / Н.Д. Алехина, Ю.В. Балнокин, В.Ф. Гавриленко и др.; под ред. И.П. Ермакова. Москва: Издательский центр «Академия», 2005. 640 с.
- Хмелев В.А., Танасиенко А.А. Земельные ресурсы Новосибирской области и пути их рационального использования / Отв. ред. В.Н. Курачев. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2009. 349 с.
- Хомич В.С., Какарека С.В., Кухарчик Т.И. Экогеохимия городских ландшафтов Беларуси / Под ред. В.С. Хомича. Минск: РУП «Минсктиппроект», 2004. 260 с.
- Шевченко А.В., Апухтина Н.В., Савич В.И. Техногенное осолонцевание почв Московской области // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. 2008. Выпуск 1. С. 50–57.
- Шишова Т.К., Матвеева Т.Б., Казанцев И.В. Влияние противогололедного материала «Бионорд» на развитие растений // Самарская Лука: проблемы региональной и глобальной экологии. 2017. – Т. 26. № 1. С. 78–84.
- Якубов Х.Г. Экологический мониторинг зеленых насаждений в крупном городе (на примере г. Москвы). Автореферат диссертации ... д-р биол. наук. Москва, 2006. 54 с.
- Cunningham M.A., Snyder E., Yonkin D., Ross M., Elsen T. Accumulation of deicing salts in soils in an urban environment // Urban Ecosystems. 2008. Vol. 11. P. 17–31. <https://doi.org/10.1007/s11252-007-0031-x>
- Czerniawska-Kusza I., Kusza G., Duzynski M. Effect of deicing salts on urban soils and health status of roadside trees in the Opole region // Environmental Toxicology. 2004. Vol. 19. No. 4. P. 296–301. <https://doi.org/10.1002/tox.20037>
- Hawkins R.H. Proceedings: street salting, urban water quality workshop. State University College of Forestry, Syracuse. NY, 1971.
- Hofman J., Trávníčková E., Anděl P. Road salts effects on soil chemical and microbial properties at grassland and forest site in protected natural areas // Plant, Soil and Environment. 2012. Vol. 58. No. 6. P. 282–288. <https://doi.org/10.17221/5994-PSE>
- IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4th edition. International Union of Soil Sciences (IUSS), Vienna, Austria, 2022. 236 p.
- Marschner H. Marschner's mineral nutrition of higher plants. 3rd edition. London: Academic Press Elsevier, 2011. 651 p.
- Scianna J., Logar R., Pick T. Plant materials technical note. Testing and interpreting salt-affected soil for tree and shrub plantings. No. MT-60. USDA-NRCS, 2007. 12 p.

Поступила в редакцию 15.04.2024

Принята 06.05.2024

Опубликована 15.08.2024

Сведения об авторах:

Барсуков Павел Анатольевич – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории агрохимии ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск, Россия); barsukov@issa-siberia.ru

Русалимова Ольга Александровна – младший научный сотрудник лаборатории агрохимии ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск, Россия); rusalimova@issa-siberia.ru

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.



Статья доступна по лицензии [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

The effect of deicing reagents on soil properties of the roadside lawns in Novosibirsk

© 2024 P. A. Barsukov , O. A. Rusalimova 

Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Lavrentieva 8/2, Novosibirsk, Russia. E-mail: barsukov@issa-siberia.ru

The aim of the study was to evaluate the effect of deicing reagents on soil properties of the roadside lawns in Novosibirsk.

Location and time of the study. Roadside lawns and a public green square in the central part of the Novosibirsk city. Field and laboratory work was performed in late 2023–early 2024.

Methods. Soil samples were analyzed according to the following methods: preparation of aqueous extract was done at the ratio of soil:solution of 1:5; determination of specific electrical conductivity and water pH was performed using the electrodes HI763123 and ESC-10603, respectively; the content of water-soluble sulfates was measured with precipitation of sulfate ions by barium chloride and determination of barium sulfate by turbidimetric method; water-soluble sodium was measured by atomic absorption spectrometer with flame atomization Kvant-2A; water-soluble chlorides were measured by ion-selective electrode Econix ECOM-Cl; and water-soluble phosphates were measured by molybdenum-blue spectrophotometric method. The statistical processing of the data was carried out using the principal components analysis, as well as by variation, regression, correlation and variance analyses.

Results. Application of deicing reagents (DR) altered most significantly the content of water-soluble sodium and chlorine in the urban soils of roadside lawns, the values of which reached as high as 443 mg Na/kg and 511 mg Cl/kg. Sulfate and phosphate concentrations depended on the DR application to a much lesser extent. The relationship of chlorine content with the sodium one was described by a simple linear regression equation with a coefficient of determination (R^2) equal to 0,92: $Cl = 1,503 \times Na - 34,655$, where Cl and Na concentrations are presented in mg/kg. A close positive relationship ($R^2 = 0,87$) was also found between the sum of all four analyzed ions (SI) and specific electrical conductivity (EC), described by the linear equation $SI = 0,0078 \times EC - 0,985$, where SI (sum of Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , and PO_4^{2-} ions) is represented in $cmol(eq)/kg$, and EC in $\mu S/cm$.

Conclusions. In the urban soils of roadside lawns, as compared to the central part of the public square, a significant increase in the content of water-soluble sodium and chlorine was found: 7–24 times and 30–80 times, respectively. The increase in the concentration of these elements was associated with a 3,3-fold increase in the value of specific electrical conductivity (which characterizes the general level of soil salinization with easily soluble salts) and a change in the reaction from "slightly alkaline" to "moderately alkaline". Such significant changes in the chemical properties of the urban roadside soils are caused by the DR use, which may result in the suppression of growth and development of plants, especially tree species less adapted to salt pollution, eventually leading to their dying-off.

Keywords: roadside lawns; urban soils; deicing reagents; anthropogenic salinity; chlorides; sulphates; phosphates; water-soluble sodium; alkalinity.

How to cite: Barsukov P.A., Rusalimova O.A. The effect of deicing reagents on soil properties of the roadside lawns in Novosibirsk. *The Journal of Soils and Environment*. 2024. 7(2). e265 DOI: [10.31251/pos.v7i2.265](https://doi.org/10.31251/pos.v7i2.265) (in Russian with English abstract).

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors are grateful to A.A. Krylova, the Leading Engineer of the Laboratory of Agrochemistry of the Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, for her assistance in the analysis of soil samples and for her help in the technical preparation of the article.

FUNDING

The study was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project No. 121031700309-1); the analysis of soil samples for assessing the impact of the use of chlorine-containing deicing reagents on the urban soil properties was financed by Contract No. 182/12-2023 for between the Municipal Autonomous Agency of the city of Novosibirsk "Gorzelenkhoz" and the Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

REFERENCES

- Vodianova M. A., Kriatov I.A., Donerian L. G., Evseeva I.S., Ushakov D. I., Sbitnev.A.V. Ecological hygienic assessment of soils quality in urban areas. *Hygiene and Sanitation, Russian journal*. 2016. Vol. 95. No. 10. P. 913–916. (in Russian). <http://dx.doi.org/10.18821/0016-9900-2016-95-10-913-916>
- Golovaty S.E., Kovalevich Z.S., Lukashenko N.K., Vishnyakov R.V. Spatial distribution of chemical pollutants in soils of the territories adjacent to the enterprises of PA "Belaruskali". *Message 2. Sodium. Pochvovedenie i agrokimiia*. 2008. No. 2 (41). P. 244–255. (in Belarus).
- Report "On the State of the Environment in the City of Moscow in 2017". Edited by A.O. Kulbachevsky. Moscow: Department of Nature Management and Environmental Protection, 2018. 358 p. (in Russian).
- Zubkova T.A., Manucharova A.S., Chernomorchenko N.I., Kostarev I.A. Influence of easily soluble salts on structural properties of mineral systems. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya 17. Pochvovedenie (Lomonosov Soil Science Journal)*. 2006. No. 2. P. 20–25. (in Russian).

- Ivanishchev V.V. About the mechanisms of plant resistance to salt and specificity of salinization influence. *Izvestiya Tula State University. Natural Science*. 2019. No. 4. P. 76–88. (in Russian).
- Changes in chemical characteristics of Moscow soils with the use of de-icing reagents. Federal Budget Institution of Science “Federal Scientific Center of Medical and Preventive Technologies of Population Health Risk Management”. 26.05.2022. URL: <https://fcrisk.ru/forums/node/1161> (accessed on 13.02.2024). (in Russian).
- Classification and diagnostics of soils of Russian / Authors and compilers: L.L. Shishov, V.D. Tonkonogov, I.I. Lebedeva, M.I. Gerasimov. Smolensk: Oykumena Publ., 2004. 342 p. (in Russian).
- Kosheleva N.E., Dorokhova M.F., Kuzminskaya N.Yu., Ryzhov A.V., Kasimov N.S. Impact of motor vehicles on the ecological state of soils in the western district of Moscow. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya*. 2018. No. 2. P. 16–27. (in Russian).
- Kryatov I.A., Tonkopiya N.I., Vodyanova M.A., Rusakov N.V., Doneryan L.G., Evseeva I.S., Ushakov D.I., Matveeva I.S., Vorobeva O.V., Tsapkova N.N. Methodical approaches to the substantiation of hygienic requirements for the application of deicing materials. *Hygiene and Sanitation, Russian journal*. 2014. Vol. 93. No. 6. P. 52–54. (in Russian).
- Kulakova N.Yu., Shabanova N.P. Soil salinization – one of the urban greening problem. Actual problems of forest complex: proceedings of the conference. 2019. No. 54. P. 127–131. (in Russian).
- Lopatina T.S., Aleksandrova Y.V., Anishchenko O.V., Gribovskaya I.V., Oskina N.A., Zotina T.A., Zadereev E.S. The effect of deicing salt solutes on *Moina macrocopa* and *Allium cepa* in a toxicity test experiment. *Tomsk State University Journal of Biology*. 2020. No. 51. P. 162–178. (in Russian). <http://dx.doi.org/10.17223/19988591/51/9>
- Lysikov A.B. Dynamics of soil pollution of pine plantations in the Moscow ring road area. *Lesovedenie*. 2005. No. 5. P. 18–24. (in Russian).
- Lysikov A.B. Influence of anti-icing agents on the soil condition of roadside pine forests of Serebryanoborsky experimental forestry. *Lesovedenie*. 2017. No. 6. P. 446–451. (in Russian). <http://doi.org/10.7868/S0024114817060079>
- Malysheva A.G., Shelepova O.V., Vodyanova M.A., Donerian L.G., Ushakova O.V., Yudin S.M. Ecological and hygienic problems of the application anti-icing agents’ under large city conditions (on the example of the city of Moscow). *Hygiene and Sanitation, Russian journal*. 2018. Vol. 97. No. 11. P. 1032–1037. (in Russian). <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2018-97-11-1032-37>
- Manzhina S.A. On the issue of chemical mechanism and soil salinity degree determination: Russian and foreign practices. *Land Reclamation and Hydraulic Engineering*. 2021. Vol. 11. No. 3. P. 163–181. (in Russian). <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2021-11-3-163-181>
- Namestnikova O.V., Buzaeva M.V. Monitoring of soil salinity in the system of ecological safety of a large city. *The Journal Modern Problems of Civil Protection*. 2019. No. 1 (30). P. 44–52. (in Russian).
- Nikiforova E.M., Kosheleva N.E., Khaibrakhmanov T.S. Ecological impact of antiglaze treatment on soils of the eastern district of Moscow. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya*. 2016. No. 3. P. 40–49. (in Russian).
- Nikolaev Y.N., Shestakova T.V., Bychkova A.Y., Markova Y.L., Lubkova T.N., Yanikieva O.E. Salt pollution of soils and vegetation in NP “Losiny Ostrov”. In book: *New Ideas in Earth Sciences. Abstracts of the V International Conference*. 2001. Vol. 4. P. 44–54. (in Russian).
- Osina K.V., Arlyapov V.A., Gorelova S.V. Anionic-cationic composition of soil in urbanized ecosystems of the Tula region. *Izvestiya Tula State University. Earth Sciences*. 2023. No. 1. P. 24–37. (in Russian).
- Petrov V.G., Khannanov D. A., Balitsky Ya. A. Mobility of the chloride ions in sod-podzolic soil under pollution by chlorides of alkali metals. *Chemical Physics and Mesoscopics*. 2019. Vol. 21. No. 2. P. 290–295. (in Russian). <https://doi.org/10.15350/17270529.2019.2.31>
- Pirogovskaya G.V., Khmelevsky S.S. Content of exchange and water-soluble sodium, chlorides and sulphates in soils of Minsk. *Počvovedenie i agrohimiâ*. 2010. No. 1. P. 243–254. (in Belarus).
- Field guide for Russian soil. Moscow: Dokuchaev Soil Science Institute, 2008. 182 p. (in Russian).
- Maximum Permissible Concentrations (MPC) of Chemical Substances in Soil: Hygienic Standarts, GN 2.1.7.2041-06. Moscow: Federal Centre of Hygiene and Epidemiology of Rospotrebnadzor, 2006. 15 p. (in Russian).
- Organization standard STO 001-80119761-2010. Deicing materials Bionord. Ural Plant of Deicing Materials. Perm, 2016. 29 p. URL: https://bionord.store/upload/iblock/f42/___-_-_-_-_-2018_19.pdf (accessed on 07.03.2024). (in Russian).
- Guide to the management of saline soils / R. Vargas, E.I. Pankova, S.A. Balyuk, P.V. Krasilnikova, G.M. Khasankhanova (ed.). FAO, Rome, 2017. 153 p. (in Russian).
- Serebryanoborsky Experimental Forestry: 65 years of forest monitoring. Moscow: KMK Scientific Press Ltd., 2010. 260

p. (in Russian).

Sidorovich E.A., Arabey N.M., Kirkovsky K.K. et al. Accumulation of chlorine ions by soils and assimilating organs of trees in urban plantations of Minsk. Problems of urban greening: almanac. Moscow: Prima-M, 2004. Issue 10. P. 203–207. (in Russian).

Condition of green plantations in Moscow (according to the 2003 monitoring data) / Edited by Kh.G. Yakubov. Moscow: Prima-M, 2004. 224 p. (in Russian).

Sudnik A.V., Voznyachuk I.P. Consequences of pollution on roadside territories by salt reagents on soil and plants ecological state in forest biogeocenoses. Forestry Bulletin. 2020. Vol. 24. No. 6. P. 83–95. (in Russian). <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2020-6-83-95>

Sudnik A.V., Yakovlev A.P. About consequences of application as an antiglaze reagent of sodium chloride on state of plantings along streets and roads in Minsk. Modern problems in botanical and mycological research. Minsk: BSU, 2021. P. 205–209. (in Russian).

Theory and practice of chemical analysis of soils. Edited by L.A. Vorobyeva. Moscow: GEOS, 2006, 400 p. (in Russian).

Plant Physiology: Textbook for university students / N.D. Alekhina, Yu.V. Balnokin, V.F. Gavrilenko and others; edited by I.P. Ermakova. Moscow: Publishing center "Academy", 2005. 640 p. (in Russian).

Khmelev V.A., Tanasienko A.A. Land resources of the Novosibirsk region and ways of their rational use / V.N. Kurachev (ed.). Novosibirsk: Publishing House SB RAS, 2009. 349 p. (in Russian).

Khomich V.S., Kakareka S.V., Kukharchyk T.I. Ecogeochemistry of urban landscapes of Belarus / V.S. Khomich (ed.). Minsk: Minsktipproekt Publ., 2004. 260 p. (in Russian).

Shevchenko, A.V.; Apukhtina, N.V., Savich, V.I. Technogenic salinization of soils of the Moscow region. Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy. 2008. Issue 1. P. 50–57. (in Russian).

Shishova T.K., Matveeva T.B., Kazantsev I.V. Influence of de-icing material «Bionord». Samarskaya Luka: problems of regional and global ecology. 2017. Vol. 26. No. 1. P. 78–84. (in Russian).

Yakubov H.G. Ecological monitoring of green plantations in a large city (by the example of Moscow). Abstract of Dissertation ... Dr. of Biol. Sci. Moscow, 2006. 54 p. (in Russian).

Cunningham M.A., Snyder E., Yonkin D., Ross M., Elsen T. Accumulation of deicing salts in soils in an urban environment. Urban Ecosystems. 2008. Vol. 11. P. 17–31. <https://doi.org/10.1007/s11252-007-0031-x>

Czerniawska-Kusza I., Kusza G., Duzynski M. Effect of deicing salts on urban soils and health status of roadside trees in the Opole region. Environmental Toxicology. 2004. Vol. 19. No. 4. P. 296–301. <https://doi.org/10.1002/tox.20037>

Hawkins R.H. Proceedings: street salting, urban water quality workshop. State University College of Forestry, Syracuse. NY, 1971.

Hofman J., Trávníčková E., Anděl P. Road salts effects on soil chemical and microbial properties at grassland and forest site in protected natural areas. Plant, Soil and Environment. 2012. Vol. 58. No. 6. P. 282–288. <https://doi.org/10.17221/5994-PSE>

IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4th edition. International Union of Soil Sciences (IUSS), Vienna, Austria, 2022. 236 p.

Marschner H. Marschner's mineral nutrition of higher plants. 3rd edition. London: Academic Press Elsevier, 2011. 651 p.

Scianna J., Logar R., Pick T. Plant materials technical note. Testing and interpreting salt-affected soil for tree and shrub plantings. No. MT-60. USDA-NRCS, 2007. 12 p.

Received 15 April 2024

Accepted 06 May 2024

Published 15 August 2024

About the authors:

Pavel A. Barsukov – Candidate of Biological Sciences, Leading Researcher in the Laboratory of Agrochemistry in the Institute of Soil Science and Agrochemistry, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); barsukov@issa-siberia.ru

Olga A. Rusalimova – Junior Researcher in the Laboratory of Agrochemistry in the Institute of Soil Science and Agrochemistry, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); rusalimova@issa-siberia.ru

The authors read and approved the final manuscript



The article is available under [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

УДК 631.4

<https://doi.org/10.31251/pos.v7i2.254>

Палеопочвы бронзового века в степной зоне Южного Приуралья в решении задач палеопочвоведения и археологии (на примере памятника Ташла IV в Оренбуржье)

© 2024 О. С. Хохлова ¹, Т. Н. Мяхшина ¹, Н. Л. Моргунова ², А. А. Файзуллин ²

¹Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, ул. Институтская, 2, г. Пушкино, Московская область, 142290, Россия. E-mail: olga_004@rambler.ru

²Оренбургский государственный педагогический университет, ул. Советская, 19, г. Оренбург, 460000, Россия. E-mail: nina-morgunova@yandex.ru

Цель исследования. Изучение палеопочв бронзового века (ямная и срубная культуры), палеоклиматические реконструкции и сопоставление с исследованными ранее синхронными палеопочвами в степном Приуралье.

Место и время проведения. Объекты исследования расположены в Оренбургской области в степной зоне Южного Приуралья. В июле 2019 и 2021 гг. совместно с сотрудниками археологической лаборатории Оренбургского педагогического университета были проведены охранные раскопки курганного могильника Ташла IV, расположенного на окраине с. Ташла, изучены курганы 1 (ямная культура) и 2 (срубная культура).

Методы. Проведен комплексный морфогенетический анализ подкурганых палеопочв и современных фоновых почв изучаемого объекта. Почвы детально описаны и классифицированы в поле, отобраны образцы, в которых в лаборатории были определены: гранулометрический состав, потери при прокаливании, рН водной вытяжки, содержание органического и карбонатного углерода, сумма обменных оснований и магнитная восприимчивость. Для проведения палеоклиматических реконструкций использованы методы построения педохронорядов и сравнительно-географический.

Основные результаты. Установлено, что изученные почвы погребены под курганами в начале развития обеих культур, когда заканчивались или закончились этапы климатической аридизации в первой половине IV тысячелетия до н.э. (ямная культура) и на рубеже III и II тысячелетий до н.э. (срубная культура). Аридизация климата в предсрубное время была более существенной, чем в ранний (репинский) этап ямной культуры; этот вывод получен для изучаемого региона впервые.

Заключение. Свойства изученных почв удалось распределить по характерным временам их отклика на изменение внешних условий: магнитная восприимчивость, связанная с микробиологической активностью, относится к быстроизменяющимся свойствам – первые десятки лет, а для изменения других изученных свойств требуется от нескольких десятков до сотни лет. Сравнение срубной палеопочвы, погребенной под курганом 2 в изученном могильнике, с другими почвами этого времени в регионе, позволило более точно расположить ее на временной шкале – отнести к самому началу XVIII в. до н.э. и детально охарактеризовать смену климата внутри срубной культуры степного Приуралья.

Ключевые слова: ямная и срубная культуры; комплексный анализ почв; свойства почв; аридизация климата; экологический кризис.

Цитирование: Хохлова О.С., Мяхшина Т.Н., Моргунова Н.Л., Файзуллин А.А. Палеопочвы бронзового века в степной зоне Южного Приуралья в решении задач палеопочвоведения и археологии (на примере памятника Ташла IV в Оренбуржье) // Почвы и окружающая среда. 2024. Том 7. № 2. e254. DOI: [10.31251/pos.v7i2.254](https://doi.org/10.31251/pos.v7i2.254)

ВВЕДЕНИЕ

Изучение почв под курганами стало с недавнего времени неотъемлемой частью работы при проведении раскопок этих исторических памятников, поскольку удается получить существенно больший объем информации, важной как для археологов, так и почвоведов, чем когда раскопки ведутся лишь археологическими методами. Основная цель при проведении такого рода работ для палеопочвоведения – это характеристика свойств палеопочв и проведение реконструкций условий среды разных эпох второй половины голоцена на основе изменчивости изучаемых свойств. В этой области науки имеются несомненные достижения, но все же остаются и проблемы, которые необходимо постепенно решать. Так, довольно часто в практике проведения палеопочвенных исследований курганов в степной зоне встречаются случаи, когда свойства черноземов, имеющих сравнительно быстрый (первый десяток лет) отклик на меняющиеся климатические условия, уже

успели измениться, а свойства с более длительными временами (несколько десятков до сотни лет) пока остаются неизменными или их изменчивость имеет иную направленность, чем у «быстрых» свойств. Это создает определенные трудности при трактовке наблюдаемых изменений в почвах в процессе реконструкций палеоклимата. Одной из задач данной работы является рассмотрение этой проблемы на примере изучаемого объекта.

В последние годы стало ясно, что данные о почвах могут помочь разобраться не только с задачами палеопочвоведения или палеогеографии, но и археологии, а именно, установить внутреннюю хронологию той или иной культуры, поскольку свойства почв, погребенных под разными курганами внутри одной и той же археологической культуры, различаются (Купцова и др., 2018; Khokhlova, Kuptsova, 2019; Morgunova, Khokhlova, 2020). Составив коротковременной хронологии из почв, погребенных под курганами одной и той же культуры и установив направленность изменчивости свойств почв, можно выстроить изученные курганы в относительном (раньше-позже) хронологическом порядке внутри временного промежутка культуры (Khokhlova, 2007). Это помогает археологам определиться с изменением вещевого материала и погребального обряда за время развития той или иной культуры. Особенно важны такие сведения для археологических культур, которые слабо разделяются внутри себя на хроноотрезки по найденным вещам и обряду захоронений ввиду скудности погребального инвентаря и/или невыразительности погребений. К таким культурам относится, в частности, срубная (XVIII-XII вв. до н.э.); ее многочисленные курганы широко распространены в степном Приуралье Оренбуржья.

Ранее были изучены подкурганые палеопочвы срубных могильников, из них составлены хронологии и выделено несколько хроносрезов внутри культуры (курганые могильники Боголюбовка и Скворцовка) (Моргунова и др., 2014; Khokhlova, Khokhlov, 2011), проведены палеоклиматические реконструкции на основе изменчивости свойств почв в составленных хронологиях. Важно, чтобы эти исследования не остались единичными, необходимо проверить их результаты на почвах других курганных могильников региона. Также значимой и актуальной представляется задача сравнения климатических условий развития ямной и срубной культур бронзового века в Южном Приуралье, особенно на ранних этапах их развития, когда обе культуры проходили фазу усиления аридизации климата. В этой связи, при проведении исследования палеопочв курганного могильника Ташла IV в степном Приуралье Оренбуржья ставились задачи: изучение свойств палеопочв, определение характерного времени трансформации этих свойств при изменяющихся условиях среды, сравнение с ранее изученными в регионе синхронными палеопочвами и между собой и проведение палеоклиматических реконструкций.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В июле 2019 и 2021 гг. сотрудниками археологической лаборатории Оренбургского педагогического университета под руководством доктора исторических наук, профессора Н.Л. Моргуновой и кандидата исторических наук А.А. Файзуллина проводились охранные раскопки **курганного могильника (КМ) Ташла IV** на северной окраине с. Ташла Оренбургской области, в 1,2 км к юго-западу от берега р. Ташелка. Изученный КМ расположен на первой террасе р. Ташелка – правого притока р. Иртек, а р. Иртек – правый приток р. Урал. В геоморфологическом отношении указанный участок территории принадлежит бассейну р. Урал и ее притоков, каковыми являются указанные реки. Рельеф участка могильника – полого-волнистый, преобладающие абсолютные высоты составляют 100 м. Почвообразующими породами служат супесчано-песчаные и суглинистые аллювиальные отложения (Географический атлас..., 1999). Основу современного почвенного покрова изученной территории составляют черноземы южные (Классификация и диагностика почв СССР, 1977), что по классификации IUSS Working Group WRB (2022) соответствует Calcic Chernozems.

Климат региона наиболее жаркий и засушливый в черноземно-степной полосе Оренбуржья. Средняя температура января – -15°C , июля – $+22^{\circ}\text{C}$, среднегодовая норма осадков – около 350 мм, испаряемость превышает количество осадков в полтора раза. Растительность нераспаханных участков данной территории – типчаково-ковыльная степь, но участок, на котором расположен изучаемый КМ, сплошь был распахан и находился в залежном состоянии к моменту нашей работы не более 20 лет, поскольку на нем произрастала, в основном, сорная растительность.

Были изучены курганы 1 и 2. Курган 1 ($51^{\circ}47'08,70''$ с.ш., $52^{\circ}43'58,62''$ в.д.) имел размеры: высота 1 м, диаметр – 33–38 м (рис. 1 А), был построен в ямное время, имел единственную конструкцию и был обнесен кольцевым ровиком. По сходству обряда захоронения с расположенным вблизи Большим Болдыревским курганом, курган 1 КМ Ташла IV был отнесен к развитому этапу А

ямной культуры – 3400–3200 лет до н.э. (Morgunova, Khokhlova, 2020) или (XXXIV–XXXII вв. до н.э.).



Рисунок 1. Курганы 1 (А) и 2 (В) курганного могильника Ташла IV у с. Ташла Оренбургской области. Фото О.С. Хохловой (А) и А.А. Файзуллина (В).

Курган 2 ($51^{\circ}47'07,56''$ с.ш., $52^{\circ}43'59,64''$ в.д.) имел размеры: высота 70 см, диаметр 35–36 м (рис. 1 В), единственную конструкцию и был построен в срубное время (3800-3700 л.н., XVIII–XVII вв. до н.э. согласно археологическому датированию). Вокруг кургана 2 был зафиксирован кольцевой ров, углубленный не более, чем на 40 см.

В поле под каждым курганом был выкопан почвенный разрез, получивший номер, совпадающий с номером кургана, и букву «п» в номере, означающую, что почва погребенная. Неподалеку от курганов был заложен разрез фоновой современной почвы (буква «ф» в номере разреза).

Аналитическое исследование включало определение гранулометрического состава, содержания органического и карбонатного углерода, потери при прокаливании, обменных оснований, pH водной

вытяжки (Аринушкина, 1970), магнитной восприимчивости – на приборе Kappabridge KLY-2 в Центре коллективного пользования ИФХиБПП РАН, г. Пущино. Ранее нами был опубликован полевой отчет о проведенных в Ташле IV палеопочвенных исследованиях (Хохлова и др., 2024, в печати).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Морфологический анализ позволил определить, что палеопочвы под двумя курганами имели следующий набор генетических горизонтов: Ah, 0–35 см; АВк, 35–50(52) см; Вк, 50(52)–130(135) см, подразделялся на два подгоризонта на глубине 100 см; ВСк, 130(135)–180 см (рис. 2 А, В).

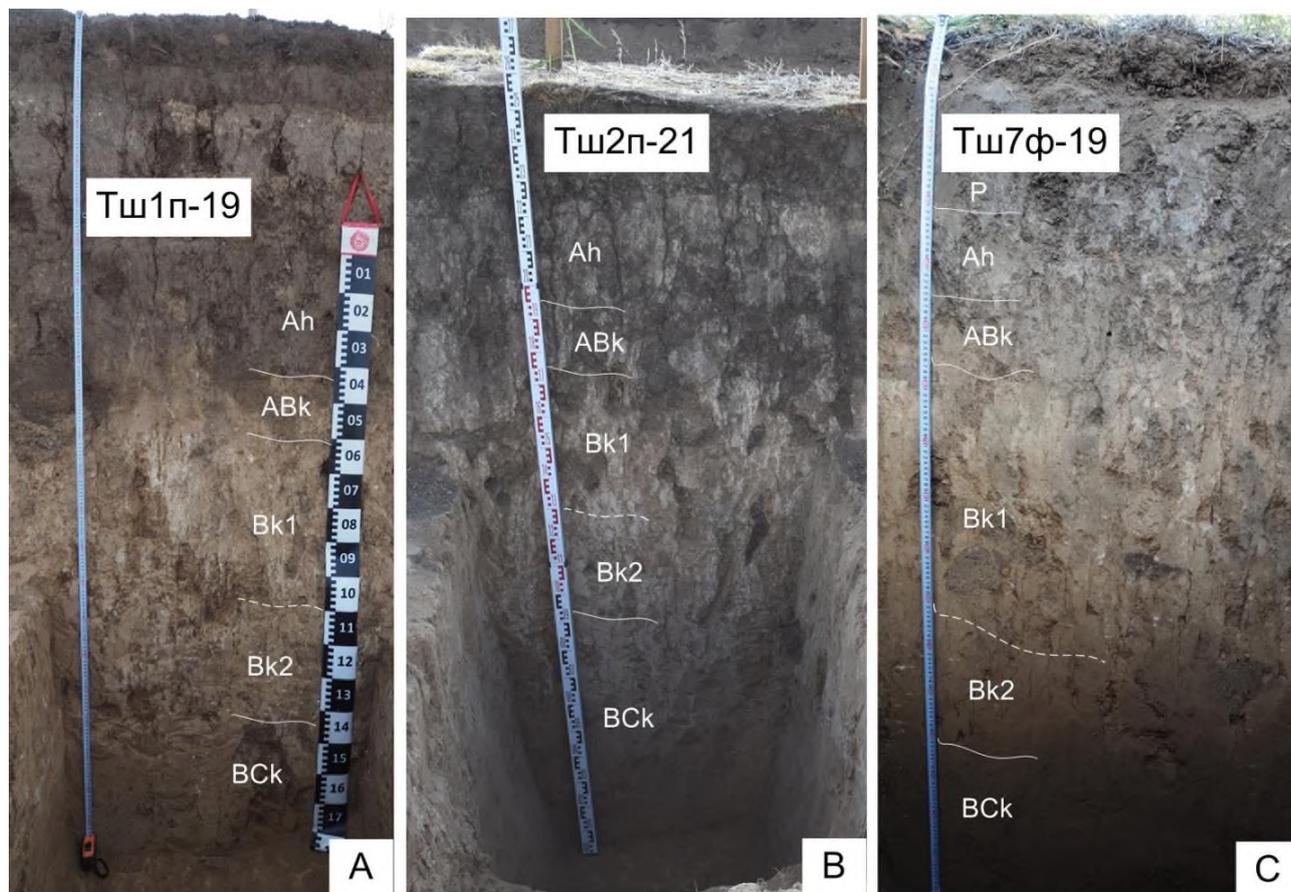


Рисунок 2. Разрезы погребенных (А, В) и фоновой (С) почв в курганном могильнике Ташла IV. Фото О.С. Хохловой (А, С), А.А. Файзуллина (В).

Горизонт Ah имел в ямной палеопочве (разрез Тш1п-19) серый цвет, 10YR 5/2-5/3, тогда как в срубной был светлее очень ненамного, показывая уверенно 10YR 5/3. Горизонт изрыт почвенными животными, структура крупно-комковатая, внутрипедная масса не вскипает, но по граням педов отмечаются белесые точки карбонатов и по норам – много карбонатных прожилок.

Горизонт АВк представлял из себя чередование палево-желтых и светло-серых пятен, в срубной палеопочве – серых пятен. При этом палево-желтые пятна в срубной палеопочве более белесые за счет заметной пропитки карбонатами: 10YR 7/3-7/4 против 10YR 6/3-6/4 в ямной почве. В совокупности, горизонты Ah и АВк в срубной палеопочве изрыты больше, чем в ямной, здесь заметно большее количество свежих на момент погребения нор землероев (сурка и слепушонки).

Горизонт Вк имеет палево-коричневатый цвет, 10YR 7/4-6/4, к низу 7/3, в местах скопления белоглазки 8/1. Призматически-комковатая структура в нижней части горизонта сменяется призматически-ореховатой. Это горизонт скопления белоглазки; белоглазка мелкая 0,3–0,5 см в диаметре, залегает скоплениями, в скоплениях ее концентрация 8–10 шт./дм², без скоплений 1–3 шт./дм². В срубной палеопочве белоглазка в горизонтах Вк1 и Вк2 более размазанная и ее визуально меньше на срезе, но зато больше насыщенность карбонатами почвенной массы вокруг белоглазки.

Горизонт ВСк неоднороден по цвету, цвет внутриагрегатной массы и граней агрегатов различаются. Желтый с палевым оттенком, 10YR 6/6 – внутриагрегатная масса, бурые с желтоватым

оттенком, 5/4 – грани агрегатов; есть островные кутаны. Структура крупно-призматическая, но призмы с угловатыми гранями. Здесь есть структуры, похожие на заполнение вертикальных криогенных трещин. Возможно, что почвообразующая порода для развития этих почв неоднородна, ее нижняя часть, начиная с горизонта ВСк, промерзала при литогенезе в позднем плейстоцене.

Классификационное название погребенных почв: черноземы обыкновенные (Классификация и диагностика почв СССР, 1977) или миграционно-сегрегационные среднесуглинистые (Классификация и диагностика почв России, 2004), что соответствует *haplic Chernozem Loamic* (IUSS Working Group WRB, 2022).

Современная почва залежи характеризуется наличием дернины – до 10 см, затем идет пахотный горизонт Р до 30(35) см, темно-серый, 10 YR 3/1-3/2, зернисто-комковатая структура, который через ровную границу плавно переходит в горизонт Ah – до 45 см (рис. 2, С). Ah имеет немного более светлый цвет, 10YR 4/2-3/2, в остальном похож на вышележащий горизонт. Горизонт АВк до 55(60) см, это чередование серых, 10 YR 5/2, и бурых, 7/3-7/4, пятен, бурые пятна вскипают. В горизонтах Р, Ah и АВк очень слабая изрытость землероями, в основном, норки мелких землероев вроде мышей. Горизонт Вк, 55(60)–130(135) см, подразделяется на два подгоризонта на глубине 100(120) см. Комковато-призматическая структура. Белоглазка диаметром 0,5 до 3 см (последняя – единично), очень размазанная, встречается скоплениями, в скоплениях 7 шт. на дм², без скоплений – 1–2 шт. на дм². В нижней части горизонта отмечается неясно-призматически-угловатая структура, есть матовые бурые островные кутаны (без манган) и Fe-Mn точки. Горизонт ВСк похож на таковой в погребенных почвах.

Классификационное положение почвы: черноземы обыкновенные (Классификация и диагностика почв СССР, 1977) или миграционно-сегрегационные постагрогенные среднесуглинистые (Классификация и диагностика почв России, 2004), что соответствует *haplic Chernozem Loamic Agric* (IUSS Working Group WRB, 2022).

Аналитическое исследование показало, что гранулометрический состав всех изученных почв – средний суглинок иловато-крупнопылеватый (табл. 1). При небольшом варьировании процентного содержания отдельных фракций можно заключить, что гранулометрический состав мало меняется по профилю изучаемых почв. Сходство гранулометрического состава почв хроноряда позволяет сравнивать свойства этих почв напрямую, без вычисления относительных величин.

Таблица 1

Гранулометрический состав почв изученного хроноряда

Разрез	Глубина, см	Фракции гранулометрического состава, мм					
		1-0,25	0,25-0,05	0,05-0,01	0,01-0,005	0,005-0,001	<0,001
Тш7ф-19	0–10	6,2	24,7	35,6	8,8	13,4	11,5
	10–20	3,0	18,4	27,3	21,7	16,7	12,8
	20–30	3,7	18,0	38,5	9,0	15,8	15,0
	30–40	2,7	15,0	37,8	8,3	15,8	20,4
	40–50	2,4	16,8	33,0	9,5	14,7	23,6
	50–60	2,9	16,6	34,6	8,4	15,0	22,6
	60–70	2,7	25,3	31,9	8,1	13,5	18,5
	70–80	2,8	21,2	32,4	2,6	19,1	21,9
	80–90	2,7	20,9	31,7	7,6	15,4	21,7
	90–100	3,7	18,1	29,4	7,3	14,9	26,5
	100–110	5,4	24,6	25,8	5,7	15,1	23,3
	110–130	4,9	23,9	24,2	5,7	16,4	25,0
	130–150	2,2	21,4	32,3	5,1	15,0	24,0
Тш1п-19	0–10	3,0	22,7	38,3	8,0	14,5	13,4
	10–20	3,3	17,9	36,0	9,3	15,7	17,8
	20–30	3,1	16,2	32,1	12,1	18,5	18,0
	30–40	2,6	13,3	35,4	8,2	18,3	22,2
	40–50	2,4	14,3	33,0	8,9	19,5	21,8
	50–60	2,4	13,4	33,7	8,3	19,5	22,8

	60–70	2,1	9,7	38,8	6,1	18,7	24,5
	70–80	2,3	20,0	34,5	4,9	16,3	21,9
	80–90	5,3	20,0	30,7	2,0	19,2	22,9
	90–100	5,8	23,3	24,6	4,7	17,0	24,6
	100–110	8,3	23,4	22,4	5,6	16,0	24,4
	110–130	7,6	23,2	23,6	5,1	17,1	23,3
	130–140	4,8	23,9	25,3	4,9	16,8	24,3
	140–160	3,2	24,8	25,2	5,1	17,2	24,6
	160–180	5,1	22,9	25,7	4,6	17,0	24,6
Тш2п-21	0–10	2,6	11,7	39,0	7,7	16,3	22,7
	10–20	2,2	16,0	34,9	6,2	14,8	25,9
	20–30	1,8	14,2	37,8	5,7	13,8	26,7
	30–40	2,3	17,5	38,3	5,0	12,6	24,3
	40–50	1,7	13,4	43,7	5,0	12,0	24,2
	50–60	1,8	18,5	43,2	4,1	10,4	22,1
	60–70	0,9	16,3	43,3	5,1	10,7	23,7
	70–80	5,4	21,3	27,1	5,6	12,4	28,2
	80–90	5,5	21,4	25,1	5,4	12,9	29,6
	90–100	5,0	24,4	23,6	6,7	12,7	27,6
	100–120	1,5	27,8	27,5	4,9	11,0	27,4
	120–140	4,2	26,8	25,3	5,4	13,1	25,3
	140–160	7,4	22,0	23,8	5,2	13,5	27,9
160–180	4,3	26,9	24,9	14,2	1,7	28,0	
180–200	5,0	23,0	25,2	6,2	13,6	27,1	

В верхнем гумусовом горизонте Ah срубной палеопочвы содержится 0,9–1,1% органического углерода, тогда как в ямной лишь 0,7–0,8%; ниже по профилю содержание постепенно уменьшается (рис. 3 А).

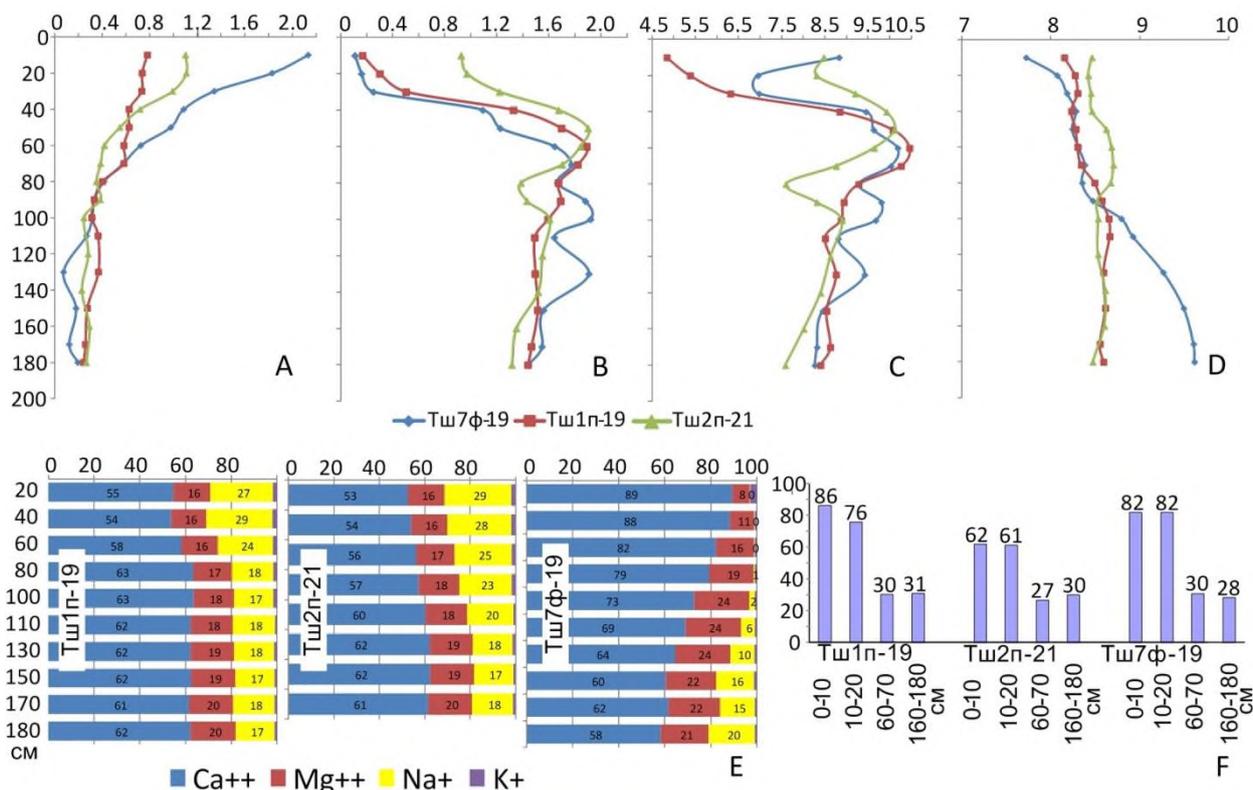


Рисунок 3. Свойства почв изучаемого хроноряда в курганном могильнике Ташла IV: органический углерод, % (А); углерод карбонатов, % (В); потери при прокаливании, % (С); pH водный (D); обменные основания, % от суммы (Е); удельная магнитная восприимчивость, $\times 10^{-8}$ ед. СИ (F).

Если учесть, что за время погребения срубной почвы (3800-3700 лет от наших дней) в почве осталось не более 50% от исходного содержания органического углерода, а в ямной почве, погребенной более 5000 лет, – 30–40% (Иванов и др., 2009), можно попытаться реконструировать исходное содержание органического углерода в А1 горизонте палеопочв. Получаем 1,8–2,2% для срубной палеопочвы и 2,0–2,3% – для ямной. Эти цифры вполне сопоставимы с содержанием органического углерода в современной пахотной почве (1,6–2,2%) в верхнем пахотном горизонте. Учитывая, что при распашке черноземов примерно 20–30% от исходного органического углерода теряется, получаем, что исходно в погребенных почвах содержалось органического углерода немного меньше, чем в современной почве, если предположить, что последняя не распахивалась: реконструированные значения содержания органического углерода в современных нераспахиваемых почвах могли бы составить 2,3–3,1%.

Для углерода карбонатов кривые распределения его содержания в профиле совпадают с наблюдаемыми в поле закономерностями. Наибольшее содержание углерода карбонатов обнаруживается в верхней 50-ти сантиметровой толще срубной палеопочвы (от 0,9 до 1,9%, разрез Тш2п-21) (рис. 3 В). На глубине 40–50 см в срубной почве выявляется наиболее приближенный к поверхности (по сравнению с двумя другими почвами хроноряда) максимум содержания карбонатов (1,9%). В ямной палеопочве в верхних 60-ти см профиля содержание углерода карбонатов постепенно нарастает от 0,2 до 1,9%, максимум содержания расположен на глубине 50–60 см. В современной почве сверху и до глубины 70 см содержание углерода карбонатов меняется от 0,1 до 1,7%, два максимума в распределении карбонатов с содержанием 1,9% наблюдаются на глубинах 90–100 и 130–140 см, то есть, расположены наиболее глубоко в профиле по сравнению с остальными почвами хроноряда.

В потери при прокаливании (ППП), т.е. в разницу веса почвы до и после нагревания при 900°C при свободном доступе воздуха, согласно (Аринушкина, 1970) входят химически связанная вода, гумус, CO₂ карбонатов, адсорбированные газы и хлориды. В современной и ямной почвах кривая распределения потерь при прокаливании в верхней части профиля носит кумулятивный характер и повторяет таковую распределения общего углерода в профилях (сумма углерода органического и карбонатного), тогда как в срубной палеопочве – кривую распределения карбонатов (рис. 3 С). Таким образом, результаты определения потерь при прокаливании, полученные методом сухого сжигания, подтверждают правильность химического определения общего углерода в общем, и карбонатного углерода, в частности, в изучаемых почвах.

pH водной вытяжки в срубной почве имеет сильнощелочные значения, 8,5 единиц pH, до глубины 40 см (рис. 3 D). Затем увеличивается до 8,7 единиц в средней части профиля, от 40 до 80 см, и далее возвращается к 8,5, не меняясь до нижней границы профиля. В ямной почве значения pH имеют величины 8,1–8,3, то есть, умеренно щелочные, от поверхности до глубины 70 см. Ниже значения колеблются в пределах 8,5–8,7, таким образом, достигая сильнощелочных значений. В современной почве до глубины 40 см, где, напоминаем, не обнаружено карбонатов, значения pH составляют от 7,7 до 8,1 – переходные от слабо- к умеренно щелочным. В средней части профиля современной почвы до глубины 90–100 см значения pH водной вытяжки совпадают с таковыми в ямной палеопочве. В нижней части профиля эти показатели становятся очень сильно щелочными, что связано, как мы полагаем, с перемещением максимума содержания карбонатов в эту часть профиля современной почвы.

По данным определения суммы обменных оснований, доля обменного кальция максимальна среди всех остальных катионов во всех изученных почвах (рис. 3 E). Но если в погребенных почвах эта доля колеблется от 55 до 62%, то в современной от 58 до 89% с максимумом в верхней части профиля. В погребенных почвах, по сравнению с современной, наблюдаются повышенные доли обменных магния и натрия: если в современной почве до глубины 40 см магний составляет 8-11%, а натрия – меньше процента, то в погребенных 16 и 27–29%, соответственно. Наибольшие различия с современной почвой в указанной толще выявлены для срубной палеопочвы. В нижней части профилей всех изучаемых почв хроноряда показатели процентного содержания катионов в сумме обменных оснований выравниваются и практически не отличаются. То есть различия по процентному содержанию обменных оснований касаются только верхней части профиля.

Магнитная восприимчивость показывает очень близкие величины для глубин 60–70 и 160–180 см, $27-31 \times 10^{-8}$ ед. СИ (рис. 3 F) в изучаемых почвах. В то же время, в верхней части профиля на глубине 0–10 и 10–20 см эта величина в ямной палеопочве составляет 86–76, в срубной – 62–61, соответственно, а в современной почве – 82×10^{-8} ед. СИ на обеих глубинах. По данным (Maher et al.,

2003), содержание почвенного (биогенного) магнетита является «магнитной записью», которая сохраняет информацию об условиях палеосреды, в частности, количестве атмосферных осадков. В указанной работе отмечено, что с ростом атмосферных осадков увеличивается и удельная магнитная восприимчивость в автоморфных почвах степной зоны, тогда как при недостатке влаги эта величина понижается.

ОБСУЖДЕНИЕ

Морфологическое изучение позволяет отметить, что изученные погребенные под курганами почвы, по сравнению с поверхностной непогребенной, больше насыщены карбонатами, уверенно вскипают с поверхности, тогда как современная почва примерно до глубины 40–45 см не вскипает от HCl. При этом срубная палеопочва (разрез Тш2п-21) имеет чуть более светлый оттенок гумусового горизонта, гораздо увереннее вскипает и содержит больше карбонатов вверху профиля, чем ямная (разрез Тш1п-19). Карбонаты в верхнем горизонте срубной палеопочвы имеют пропиточный характер, что указывает на то, что они подтянулись снизу при резком иссушении почвенного профиля. По степени изрытости профиля почвенными животными, особенно верхней его части, срубная палеопочва наиболее изрыта. Современная почва изрыта в наименьшей степени, прокрашена гумусом максимально среди остальных почв хроноряда в силу того, что гумус в ней не подвергся биоминерализации, как в погребенных почвах.

В дополнение к морфологическому анализу аналитическое исследование почв изучаемого хроноряда показало, что палеопочвы как ямной, так и срубной времени по сравнению с современной почвой имеют меньшие величины реконструированного содержания органического углерода в гумусовом горизонте, более высоко расположенные максимумы содержания карбонатов в профиле, более щелочные значения pH водной вытяжки в первом метре профиля, более высокие значения процентного содержания магния и натрия в составе обменных оснований. При этом палеопочва срубной времени обнаруживает наименьшие значения реконструированного содержания органического углерода, наиболее высоко расположенный профильный максимум содержания карбонатов, наиболее щелочные значения pH, наибольшее содержание обменного магния и натрия в составе обменных оснований среди почв изучаемого хроноряда и наименьшие величины магнитной восприимчивости в самых верхних слоях гумусового горизонта: 0–10 и 10–20 см. Исходя из этих данных можно заключить, что условия формирования палеопочв были более аридными, чем современные климатические условия; при этом, если сравнить степень аридизации климата при формировании свойств срубной и ямной палеопочв изучаемого хроноряда, в первом случае степень аридизации была выше.

Некоторое увеличение магнитной восприимчивости в самом верхнем слое 0–10 см ямной палеопочвы по сравнению с современной, указывающее на большее количество осадков при формировании первой по сравнению со второй, не укладывается в высказанное выше заключение о более аридном климате во время формирования ямной почвы. Для того, чтобы разобраться, надо понять, какие процессы влияют на магнитную восприимчивость почв и также вспомнить о реконструкциях климата на основе изучения ямных и срубных палеопочв в наших более ранних работах по региону. Изменчивость магнитной восприимчивости в автоморфных степных почвах связана с деятельностью бактерий-железоредукторов, находящихся в гумусовом горизонте, которые реагируют на климатические изменения (Заварзина и др., 2003). В сравнительно хорошо увлажняемых атмосферными осадками почвах их деятельность протекает более выражено, что и приводит к повышению магнитной восприимчивости в сравнительно гумидные периоды; напротив, в аридные периоды деятельность этих бактерий угнетена. Таким образом, магнитная восприимчивость самых верхних слоев гумусовых горизонтов почв степной зоны по факту отражает микробиологическую активность, а это почвенное свойство с очень быстрым откликом (первый десяток лет) на изменившиеся климатические условия в отличие от остального набора почвенных свойств, указанных выше, которые меняются за более длительное время (от нескольких десятков до сотни лет). Следовательно, основной набор свойств ямной палеопочвы сформирован в сравнительно аридное время, но перед самым погребением почв климат сменился на гумидный. На смену климата (усиление гумидности) успели отреагировать пока только магнитные свойства самого верхнего слоя гумусового горизонта, 0–10 см, тогда как магнитная восприимчивость в слое 0–20 см все еще ниже в ямной палеопочве, чем в современной.

Согласно проведенным ранее палеореконструкциям, на протяжении развития срубной культуры в Южном Приуралье, XIX век до н.э. был экстремально-аридным (Khokhlova, Kuptsova, 2019),

приведшим к опустыниванию степи и ее депопуляции. Период между окончанием третьего и началом второго тысячелетия до н.э. в заволжских степях современной Волгоградской области, согласно изучению подкурганых почв (Демкин и др., 2010), был охарактеризован как экологический кризис, имевший катастрофические последствия для ландшафтов региона: изреживание растительного покрова, дефляция и сильная эрозия почв. Вместе с тем, палеопочвы раннего периода развития срубной культуры (XVIII-XVII вв. до н.э.) в Боголюбовском и Скворцовском курганных могильниках Южного Приуралья отражают в своих свойствах смягчение аридизации и похолодание климата (Khokhlova, Khokhlov, 2011; Khokhlova, Kuptsova, 2019). Напомним, что изучаемая в курганном могильнике Ташла IV срубная палеопочва отнесена к XVIII-XVII вв. до н.э. Дополнительно отметим, что по набору свойств почвы, погребенной под срубным курганом 2 в курганном могильнике Ташла IV, сооружение этого кургана можно с уверенностью отнести к верхней границе упомянутого интервала – самому началу XVIII в. до н.э., то есть времени, когда эпизод усиления аридизации климата на рубеже между третьим и вторым тысячелетием до н.э. в рассматриваемом регионе уже закончился или заканчивался и в почвах еще не успели проявиться признаки начавшейся гумидизации климата во время начального этапа развития срубной культуры. Для археологов важной является информация, что по свойствам срубная почва КМ Ташла IV близка к палеопочвам кургана 4 КМ Скворцовский (Моргунова и др., 2010), курганов 3 и 11 КМ Боголюбовский, но погребена все же позже, чем палеопочва под курганом 12 этого же могильника, отнесенная к XIX веку до н.э. (Моргунова и др. 2014).

Что касается ямной палеопочвы КМ Ташла IV, напомним, что развитой этап А ямной культуры, к которому отнесена изучаемая под курганом 1 почва, характеризовался самой начальной стадией гумидизации климата (Morgunova, Khokhlova, 2020), что вполне соответствует набору свойств данной почвы. Поскольку почвы неподалеку расположенного кургана 1 КМ Болдырево IV по времени погребения очень близки к кургану 1 КМ Ташла IV, подтвердим, что и выводы по палеоклимату на основании изучения двух КМ совпадают (Сверчкова и др., 2022). Дополнительно можно заключить, что аридизация климата в предсрубное время была более существенной, чем в ранний (репинский) этап ямной культуры; этот вывод получен для изучаемого региона впервые.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате работы с палеопочвами ямного и срубного курганов курганного могильника Ташла IV в Оренбуржье удалось установить:

- почвы как ямного, так и срубного курганов погребены в начале развития своих культур, когда заканчивались или закончились этапы усиления климатической аридизации первой половины IV тысячелетия до н.э. и на рубеже III и II тысячелетий до н.э., соответственно;
- этап усиления аридизации климата в начале развития ямной культуры был менее интенсивным, чем в начале развития срубной общности в изучаемом степном Приуралье;
- свойства изученных почв по характерным временам их отклика на изменение внешних условий различаются: магнитная восприимчивость, связанная с микробиологической активностью, относится к быстроизменяющимся свойствам – первые десятки лет, а для изменения других изученных свойств требуется от нескольких десятков до сотни лет.
- сравнение срубной палеопочвы, погребенной под курганом 2 в изученном могильнике, с другими почвами этого времени в регионе позволило более точно расположить ее на временной шкале – отнести к самому началу XVIII в. до н.э. и детально охарактеризовать смену климата внутри срубной культуры степного Приуралья.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда на тему «Этнокультурные процессы в бронзовом и раннем железном веке» (проект № 23-68-10006); статья написана в рамках выполнения госзадания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № 122040500036-9).

ЛИТЕРАТУРА

- Аринушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. Москва: Изд-во Моск. ун-та, 1970. 488 с.
- Географический атлас Оренбургской области / А.А. Чибилев (ред.). Москва: Изд-во ДИК, 1999. 96 с.
- Демкин В.А., Борисов А.В., Удальцов С.Н. Палеопочвы и климат юго-востока Среднерусской возвышенности в эпохи средней и поздней бронзы (XXV-XV вв. до н.э.) // Почвоведение. 2010. № 1. С. 7–17.

Заварзина Д.Г., Алексеев А.О., Алексеева Т.В. Роль железоредуцирующих бактерий в формировании магнитных свойств степных почв // Почвоведение. 2003. № 10. С. 1218–1227.

Иванов И.В., Песочина Л.С., Семенов В.М. Биоминерализация органического вещества в современных целинных, пахотных, погребенных и ископаемых черноземах // Почвоведение. 2009. № 10. С. 1192–1202.

Классификация и диагностика почв СССР / Составители: В.В. Егоров, В.М. Фридланд, Е.Н. Иванова, Н.Н. Розова, В.А. Носин, Т.А. Фриев. Москва: Колос, 1977. 224 с.

Классификация и диагностика почв России / Авторы и составители: Л.Л. Шишов, В.Д. Тонконогов, И.И. Лебедева, М.И. Герасимова. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.

Купцова Л.В., Моргунова Н.Л., Салугина Н.П., Хохлова О.С. Периодизация срубной культуры Западного Оренбуржья по археологическим и естественно-научным данным // Археология, этнография и антропология Евразии. 2018. Том 46. № 1. С. 100–107. <https://doi.org/10.17746/1563-0102.2018.46.1>

Моргунова Н.Л., Гольева А.А., Дегтярева А.Д., Евгеньев А.А., Купцова Л.В., Салугина Н.П., Хохлова О.С., Хохлов А.А. Скворцовский курганный могильник. Оренбург: Изд-во ОГПУ, 2010. 160 с.

Моргунова Н.Л., Гольева А.А., Евгеньев А.А., Крюкова Е.А., Купцова Л.В., Рослякова Н.В., Салугина Н.П., Турецкий М.А., Хохлов А.А., Хохлова О.С. Боголюбовский курганный могильник срубной культуры в Оренбургской области. Оренбург: Изд-во ОГПУ, 2014. 172 с.

Сверчкова А.Э., Хохлова О.С., Моргунова Н.Л., Мякшина Т.Н. Большой Болдыревский курган раннего бронзового века в Южном Приуралье: курганные конструкции, палеопочвы, реконструкции палеоклимата // Почвоведение. 2022. № 6. С. 687–700. <https://doi.org/10.31857/S0032180X22060132>

Хохлова О.С., Мякшина Т.Н., Файзуллин А.А. Палеопочвенное изучение курганов в курганном могильнике Ташла IV // Археологические памятники Оренбуржья: сборник научных трудов. Вып. 17. Оренбург: Изд-во Оренбургского педагогического университета, 2024. (в печати).

IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4th edition. International Union of Soil Sciences (IUSS), Vienna, Austria, 2022. 236 p.

Khokhlova O.S. Rapid Changes in Chernozem Properties During their Holocene Evolution: A Case Study of Paleosols Buried under Kurgans in the Pre-Ural Steppe, Russia // Revista Mexicana de Ciencias Geológicas. 2007. Vol. 24. No. 2. P. 270–282.

Khokhlova O.S., Khokhlov A.A. Short and long-term pedochronosequences of the Skvortsovsky burial ground in the Buzuluk River valley (Orenburg region, Russia). Kurgan Studies: An environmental and archaeological multiproxy study of burial mounds in the Eurasian steppe zone. A. Peto and A. Barczy (Eds.). British Archaeological Reports International Series 2238. 2011. Paper 16. P. 259–268.

Khokhlova O., Kuptsova L. Complex pedological analysis of paleosols buried under kurgans as a basis for periodization of the Timber-grave archaeological culture in the Southern Cis-Ural, Russia // Quaternary International. 2019. Vol. 502. Part B. P. 181–196. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2018.02.027>

Morgunova N.L., Khokhlova O.S. Development of ancient cultures and paleoenvironment during the Eneolithic Period and the Early Bronze Age in the Southern Cis-Urals steppe (Russia) // Archaeological and Anthropological Sciences. 2020. Vol. 12. P. 241. <https://doi.org/10.1007/s12520-020-01197-w>

Поступила в редакцию 15.03.2024

Принята 14.04.2024

Опубликована 29.04.2024

Сведения об авторах:

Хохлова Ольга Сергеевна – доктор географических наук, главный научный сотрудник лаборатории экологии и генезиса почв Института физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН (Московская область, г. Пущино, Россия); olga_004@rambler.ru

Мякшина Татьяна Николаевна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории экологии и генезиса почв Института физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН (Московская область, г. Пущино, Россия); mtn59@mail.ru

Моргунова Нина Леонидовна – доктор исторических наук, профессор, ведущий научный сотрудник лаборатории археологии Оренбургского государственного педагогического университета (г. Оренбург, Россия); nina-morgunova@yandex.ru

Файзуллин Айрат Асхатович – кандидат исторических наук, научный сотрудник лаборатории археологии Оренбургского государственного педагогического университета (г. Оренбург, Россия); faizullin.airat@yandex.ru

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.



Статья доступна по лицензии [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Bronze age paleosols in the steppe area of the southern Cis-Urals in solving the problems of paleopedology and archaeology (a case-study of the Tashla IV site in the Orenburg region)

© 2024 O. S. Khokhlova ¹, T. N. Myakshina ¹, N. L. Morgunova ², A. A. Faizullin ²

¹*Institute of Physical, Chemical and Biological Problems of Soil Science of the Russian Academy of Sciences, Institutskaya, 2, Moscow region, Pushchino, Russia. E-mail: olga_004@rambler.ru*

²*Orenburg State Pedagogical University, Sovetskaya str. 19., Orenburg, Russia. E-mail: nina-morgunova@yandex.ru*

The aim of the study. To study the Bronze Age paleosols (Yamnaya and Srubnaya cultures), perform paleoclimatic reconstructions and comparison with previously studied synchronous paleosols in the Cis-Urals steppe.

Location and time of the study. The studied site is located in the Orenburg region in the steppe area of the Southern Cis-Urals. In July 2019 and 2021 together with researchers from the archaeological laboratory of the Orenburg Pedagogical University, rescue excavations were carried out at the Tashla IV kurgan cemetery, located near the Tashla village. Kurgans 1 (Yamnaya culture) and 2 (Srubnaya culture) were studied.

Methods. A comprehensive morphogenetic analysis of the soils buried beneath the kurgans and surface soils of the studied site was carried out; the soils were described in detail and classified in the field. Soil samples were analyzed for particle size distribution, loss of ignition, pH of the water extraction, content of organic and carbonate carbon, exchangeable bases and magnetic susceptibility. To carry out the paleoclimatic reconstructions, the chronosequence and comparative geographic methods were used.

Results. It was established that the studied soils were buried under the kurgans at the beginning of the development of both cultures, when the stages of climatic aridization were close to their ending or ended in the first half of the 4th millennium BC (Yamnaya culture) and at the turn of the 3rd and 2nd millennia BC (Srubnaya culture). The climatic aridization during the Early stage of the Srubnaya culture was more significant than in the Early (Repinsky) stage of the Yamnaya culture, and this conclusion was made for the first time for the studied region.

Conclusions. The studied soils properties could be grouped according to the characteristic times of their response to changes in external conditions: magnetic susceptibility, associated with microbiological activity, refers to rapidly changing properties, i.e. in the first decades, whereas changes in other studied properties require from several decades to hundreds of years. Comparison of the Srubnaya paleosol buried under kurgan 2 in the studied site with other soils of the same culture in the region made it possible to place it more accurately on the time scale, attributing to the very beginning of the 18th century BC, and additionally to characterize in detail the climate change within the time span of the Srubnaya culture of the Cis-Urals steppe.

Keywords: Yamnaya and Srubnaya cultures; comprehensive soil analysis; soil properties; climatic aridization; environmental crisis.

How to cite: Khokhlova O.S., Myakshina T.N., Morgunova N.L., Faizullin A.A. Bronze age paleosols in the steppe area of the Southern Cis-Urals in solving the problems of paleopedology and archaeology (a case-study of the Tashla IV site in the Orenburg region). *The Journal of Soils and Environment*. 2024. 7(2). e254 (in Russian with English abstract). DOI: [10.31251/pos.v7i2.254](https://doi.org/10.31251/pos.v7i2.254)

FUNDING

The study was financially supported by the Russian Scientific Foundation (project No. 23-68-10006) and the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project No. 122040500036-9).

REFERENCES

- Arinushkina E.V. Guide to the chemical analysis of soils. Moscow: Publishing House of Moscow University, 1970. 488 p. 1970. (in Russian).
- Geographical atlas of the Orenburg region / A.A. Chibilev (ed.). Moscow: DIK Press, 1999. 96 p. (in Russian).

Demkin V.A., Borisov A.V., Udaltsov S.N. Paleosols and climate in the southeast of the Central Russian Upland during the Middle and Late Bronze ages (the 25th-15th Centuries BC). *Eurasian Soil Science*. 2010. Vol. 43. No. 1. P. 5–14. <https://doi.org/10.1134/S1064229310010023>

Zavarzina D.G., Alekseev A.O., Alekseeva T.V. The role of iron-reducing bacteria in the formation of magnetic properties of steppe soils. *Eurasian Soil Science*. 2003. Vol. 36. No. 10. P. 1085–1094.

Ivanov I.V., Pesochina L.S., Semenov V.M. Biological mineralization of organic matter in the modern virgin and plowed chernozems, buried chernozems, and fossil Chernozems. *Eurasian Soil Science*. 2009. Vol. 42. No. 10. P. 1109–1119. <https://doi.org/10.1134/S1064229309100056>

Classification and diagnostics of soils of the USSR / Compiled by: V.V. Egorov, V.M. Friedland, E.N. Ivanova, N.N. Rozova, V.A. Nosin, T.A. Frieв. Moscow: Kolos Publ., 1977. 224 p. (in Russian).

Classification and diagnostics of soils of Russian / Authors and compilers: L.L. Shishov, V.D. Tonkonogov, I.I. Lebedeva, M.I. Gerasimov. Smolensk: Oykumena Publ., 2004. 342 p. (in Russian).

Kuptsova L.V., Morgunova N.L., Salugina N.P., Khokhlova O.S. A periodization of the Timber-Grave culture in the western Orenburg region: Archaeological and natural science-based evidence. *Archaeology, Ethnology and Anthropology of Eurasia*. 2018. Vol. 46. No. 1. P. 100–107. <https://doi.org/10.17746/1563-0110.2018.46.1.100-107>

Morgunova N.L., Golyeva A.A., Degtjareva A.D., Evgenjev A.A., Kuptsova L.V., Salugina N.P., Khokhlova O.S., Khokhlov A.A. Skvortsovsky kurgan cemetery. Orenburg: OGPU Press, 2010. 160 p. (in Russian).

Morgunova N.L., Golyeva A.A., Evgenjev A.A., Krjukova E.A., Kuptsova L.V., Rosljakova N.V., Salugina N.P., Turetsky M.A., Khokhlov A.A., Khokhlova O.S. Bogoljubovsky kurgan cemetery of the Srubnaya culture in Orenburg region. Orenburg: OGPU Press, 2014. 172 p. (in Russian).

Sverchkova A.E., Khokhlova O.S., Myakshina T.N., Morgunova N.L. Big Boldyrevo Kurgan of the Early Bronze Age in the Southern Urals: Kurgan Structures, Paleosols, and Paleoclimate Reconstruction. *Eurasian Soil Science*. 2022. Vol. 55. No. 6. P. 722–733. <https://doi.org/10.1134/S1064229322060138>

Khokhlova O.S., Myakshina T.N., Fayzullin A.A. Paleopedological study of kurgans in kurgan cemetery Tashla IV. Archaeological sites of Orenburg region: Collection of scientific papers. Iss. 17. Orenburg: Orenburg State Pedagogical University Press, 2024. (in press). (in Russian).

IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4th edition. International Union of Soil Sciences (IUSS), Vienna, Austria, 2022. 236 p.

Khokhlova O.S. Rapid Changes in Chernozem Properties During their Holocene Evolution: A Case Study of Paleosols Buried under Kurgans in the Pre-Ural Steppe, Russia. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. 2007. Vol. 24. No. 2. P. 270–282.

Khokhlova O.S., Khokhlov A.A. Short and long-term pedochronosequences of the Skvortsovsky burial ground in the Buzuluk River valley (Orenburg region, Russia). *Kurgan Studies: An environmental and archaeological multiproxy study of burial mounds in the Eurasian steppe zone*. A. Peto and A. Barzi (Eds.). British Archaeological Reports International Series 2238. 2011. Paper 16. P. 259–268.

Khokhlova O., Kuptsova L. Complex pedological analysis of paleosols buried under kurgans as a basis for periodization of the Timber-grave archaeological culture in the Southern Cis-Ural, Russia. *Quaternary International*. 2019. Vol. 502. Part B. P. 181–196. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2018.02.027>

Morgunova N.L., Khokhlova O.S. Development of ancient cultures and paleoenvironment during the Eneolithic Period and the Early Bronze Age in the Southern Cis-Urals steppe (Russia). *Archaeological and Anthropological Sciences*. 2020. Vol. 12. P. 241. <https://doi.org/10.1007/s12520-020-01197-w>

Received 14 March 2024

Accepted 15 April 2024

Published 29 April 2024

About the authors:

Olga S. Khokhlova – Doctor of Geography, Chief Researcher of the Laboratory of Soil Ecology and Genesis in the Institute of Physical, Chemical and Biological Problems of Soil Science, Russian Academy of Sciences (Moscow Region, Pushchino, Russia); olga_004@rambler.ru

Tatyana N. Myakshina – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher of the Laboratory of Soil Ecology and Genesis in the Institute of Physical, Chemical and Biological Problems of Soil Science, Russian Academy of Sciences (Moscow Region, Pushchino, Russia); mtn59@mail.ru

Nina L. Morgunova – Doctor of Historical Sciences, Professor, Leading Researcher of the Laboratory of Archeology, Orenburg State Pedagogical University (Orenburg, Russia); nina-morgunova@yandex.ru

Airat A. Fayzullin – Candidate of Historical Sciences, Leading Researcher of the Department of Scientific Research, Orenburg State Pedagogical University (Orenburg, Russia); faizullin.airat@yandex.ru

The authors read and approved the final manuscript



The article is available under [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)