



Почвы и окружающая среда

Научный журнал

Том 8. Выпуск 3

2025

<https://soils-journal.ru>

The Journal of Soils and Environment

Scientific Journal

Volume 8. Issue 3

2025



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)

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)

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 okružaúsaâ sreda) / 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).

© 2025 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. Androkhanov – 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)

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)

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 okružâûšââ 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

© 2025 Institute of Soil Science and Agrochemistry of SB RAS

Содержание

Органическое вещество и биохимия почв

Матышак Г.В., Архипова М.В., Дурманов Н.Д., Гончарова О.Ю., Кондрашкина М.И., Корденков С.Н. Карбоновый полигон «Покровский»: методические аспекты организации полевого опыта по оценке влияния многолетних кормовых культур на секвестрацию углерода почвами агроэкосистем e318

Шарков И.Н. Методика количественного определения дыхания почвы в полевых условиях e334

Гопп Н.В. Цифровое картографирование содержания органического углерода в почвах Кузнецко-Салаирской геоморфологической провинции с использованием онлайн-платформы Google Earth Engine e335

Теоретические и прикладные проблемы почвоведения

Суханова Н.И., Кирюшин А.В., Ларин Н.В. Влияние водорода на окислительно-восстановительные свойства и гумус черноземных почв (на примере модельных опытов) e310

Попов В.В., Кравцов Ю.В., Елизаров Н.В. Преобразование солевого состава почв Ишимской степи при изменении их влажности e322

Генезис, экология и география почв

Симонова Ю.В., Касаткина Г.А., Чарыкова М.В., Жунусова О.Р. Почвы Кучук-Кулундинских приозерных ландшафтов (Алтайский край): морфология, засоление, классификационное положение e313

Балков Е.В., Барсуков П.А., Шалагинов А.Е., Карин Ю.Г., Прокопьев А.В., Русалимова О.А. Внутрипольное зонирование почвенного покрова по данным геофизических методов e338

Плодородие почв и минеральное питание растений

Барсуков П.А. Трансформация аммиачных, аммонийных и амидных удобрений в черноземных почвах e337

Почвенно-физические процессы, свойства и режимы

Чумбаев А.С., Миллер Г.Ф., Соловьев С.В., Безбородова А.Н., Гожоев М.Б. Специфика насыщения снеготалыми водами почв агроценозов юго-востока Западной Сибири e339

Деградация, рекультивация и мелиорация почв

Петров А.А., Саввинов Г.Н., Данилова А.А. Оценка почвенно-экологического состояния посттехногенных ландшафтов добычи алмазов в Якутии e325

Безуглова О.С., Кушнарева А.В., Горбов С.Н., Омелянчук А.А., Тагивердиев С.С. Постмелиоративное состояние темно-каштановой почвы рисового севооборота e328

Взаимодействие почва – растение – микробиом в экосистемах

Наумова Н.Б., Нечаева Т.В., Батурина О.А., Кирпиков А.А., Савенков О.А., Кабилов М.Р. Ризосферный бактериобиом и продукция томатов при внесении минеральных удобрений в условиях открытого грунта на юге Западной Сибири e336

Обзоры, дискуссии, памятные даты

Соколова Н.А., Смоленцев Б.А. Исторические этапы развития исследований в лаборатории географии и генезиса почв Института почвоведения и агрохимии СО РАН e317

Contents

Soil Organic Matter and Biochemistry

- Matyshak G.V., Arkhipova M.V., Durmanov N.D., Goncharova O.J., Kondrashkina M.I., Kordenkov S.N.** Carbon polygon (test site) "Pokrovsky": methodological aspects of setting up a field experiment to assess the impact of perennial forage grasses on carbon sequestration by soils of agroecosystems e318
- Sharkov I.N.** Methodology of quantitative determination of soil respiration in field conditions e334
- Gopp N.V.** Digital mapping of soil organic carbon content in the Kuznetsk-Salair geomorphological province using the Google Earth Engine platform e335

Fundamental and Applied Soil Science

- Sukhanova N.I., Kiryushin A.V., Larin N.V.** The effect of hydrogen on the chernozem redox properties and humus in model experiments e310
- Popov V.V., Kravtsov Y.V., Elizarov N.V.** Salt composition transformation in the Ishim steppe soils with changes in their moisture e322

Soil Genesis, Ecology and Geography

- Simonova Y.V., Kasatkina G.A., Charykova M.V., Zhunusova O.R.** Soils of the Kuchuk-Kulunda lakeside landscapes (Altai Krai): morphology, salinization, taxonomic attribution e313
- Balkov E.V., Barsukov P.A., Shalaginov A.E., Karin Y.G., Prokopyev A.V., Rusalimova O.A.** Intra-field zoning of soil cover based on geophysical methods e338

Soil Fertility and Mineral Nutrition of Plants

- Barsukov P.A.** Transformation of ammonia, ammonium and amide fertilizers in chernozemic soils e337

Soil Physical Processes, Properties and Regimes

- Chumbaev A.S., Miller G.F., Solovyev S.V., Bezborodova A.N., Gozhoev M.B.** Saturation of agricultural soils with snowmelt waters in the south-east of West Siberia e339

Soil Degradation, Recultivation and Melioration

- Petrov A.A., Savvinov G.N., Danilova A.A.** Assessment of soil-ecological status of post-technogenic diamond mining landscapes in Yakutia e325
- Bezuglova O.S., Kushnareva A.V., Gorbov S.N., Omelyanchuk A.A., Tagiverdiev S.S.** The post-amelioration status of the dark-chestnut soil in rice crop rotation e328

Interaction Soil – Plant – Microbiome in Bioecosystems

- Naumova N.B., Nechaeva T.V., Baturina O.A., Kirpikov A.A., Savenkov O.A., Kabilov M.R.** Rhizosphere bacteriobiome and tomato production under mineral fertilization in the open field in the south of West Siberia e336

Reviews, Discussions and Memoria

- Sokolova N.A., Smolentsev B.A.** The History of Research in the Laboratory of Soil Geography and Genesis of the Institute of Soil Science and Agrochemistry (SB RAS, Novosibirsk, Russia) e317

УДК 631.421:631.9

<https://doi.org/10.31251/pos.v8i3.318>

Карбоновый полигон «Покровский»: методические аспекты организации полевого опыта по оценке влияния многолетних кормовых культур на секвестрацию углерода почвами агроэкосистем

© 2025 Г. В. Матышак , М. В. Архипова , Н. Д. Дурманов , О. Ю. Гончарова , М. И. Кондрашкина , С. Н. Корденков

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», ул. Мясницкая, д. 206, г. Москва, 101000, Россия. E-mail: matyshak@gmail.com

Цель исследования. Дать общую характеристику истории землепользования и свойств почв залежных участков, отведенных под экспериментальные поля на карбоновом полигоне «Покровский»; обосновать методологию закладки полевого опыта по оценке влияния многолетних кормовых культур на секвестрацию углерода почвами.

Место и время проведения. Исследования проводили на экспериментальных полях полигона «Покровский», расположенного в центре Восточно-Европейской равнины на границе Смоленской и Калужской областей в среднем течении р. Угра в 2023–2024 годах.

Методы. Исследования включали: характеристику истории землепользования на основе исторических картографических материалов, подробное картографирование почвенного покрова участка, оценку химических, физических, агрохимических свойств почв стандартными методами, а также оценку их биологической активности на основе измерения эмиссии CO₂ с поверхности почвы камерным методом.

Основные результаты. Агродерново-подзолистые почвы экспериментальных полей характеризовались низкими запасами гумуса и средней степенью обеспеченности питательными элементами с высокой степенью варьирования. Запасы углерода в слое 0–20 см почвы двух экспериментальных полей составили 38,3 и 41,3 т/га. Установлено, что в весенний период до посева культур почвы повторностей закладываемого полевого опыта значимо не различались по таким показателям как: температура, влажность, эмиссия CO₂. Вклад корневого дыхания в эмиссию CO₂ составил около 50% на пике вегетации для злаковых смесей и бобовых культур.

Заключение. К лету 2024 года на карбоновом полигоне «Покровский» имелось четыре экспериментальных участка, располагающихся на двух полях. Три участка организованы в начале 2023 года: монодоминантная посадка клевера лугового, смесь многолетних злаковых культур и клевера лугового и многолетние злаковые культуры. На четвёртом участке в конце весны 2024 года заложен однофакторный полевой деляночный опыт с многолетними бобово-злаковыми смесями, подобранными с учетом их физиологических особенностей и влияния на секвестрацию углерода, на идентичных по физико-химическим и биологическим почвенным показателям делянках.

Ключевые слова: дерново-подзолистые почвы; карбоновый полигон; полевой деляночный опыт; почвопокровные культуры; секвестрация углерода; эмиссия CO₂.

Цитирование: Матышак Г.В., Архипова М.В., Дурманов Н.Д., Гончарова О.Ю., Кондрашкина М.И., Корденков С.Н. Карбоновый полигон «Покровский»: методические аспекты организации полевого опыта по оценке влияния многолетних кормовых культур на секвестрацию углерода почвами агроэкосистем // Почвы и окружающая среда. 2025. Том 8. № 3. е318. DOI: [10.31251/pos.v8i3.318](https://doi.org/10.31251/pos.v8i3.318)

ВВЕДЕНИЕ

Органическое вещество почв играет ключевую роль с точки зрения секвестрации атмосферного CO₂. В мире содержание углерода в почвах превышает его содержание в растительной биомассе в 3 раза, а в России, занимающей большую часть площади Северной Евразии, в 7,5 раз (Кудеяров, 2015; Кудеяров и др., 2007). Именно поэтому баланс углерода является главным критерием эффективности ведения сельскохозяйственной деятельности с учётом стремления к углеродной нейтральности (Сычёв, Налиухин, 2021). Дегумусирование (процесс уменьшения содержания в почве органического углерода и мощности гумусового профиля с ухудшением качественного состава почвенного органического вещества (Семенов, Когут, 2015)) — практически повсеместно имеет место при активном сельскохозяйственном производстве, т.е. земли сельскохозяйственного назначения являются, в большинстве своем, источником CO₂ в атмосферу. В настоящее время, в связи с усиливающейся климатической повесткой, ведется поиск новых систем земледелия, реализация которых позволила бы, с одной стороны, повысить эффективность сельского хозяйства, а с другой — сделать его

ресурсосберегающим. Перспективной является адаптивная интенсификация сельского хозяйства, которая ориентирует на необходимость более полного использования природных ресурсов за счет биологизации в агроэкосистемах, внедрения методов, обеспечивающих восстановление почв в процессе использования, применения технологий, обеспечивающих уменьшение поступления парниковых газов в атмосферу при ведении регенеративного (восстановительного) сельского хозяйства (Соколов и др., 2019; Битва за климат ..., 2021). Внедрение методов хозяйствования, связанных с использованием покровных культур, отказ от пропашных культур, ограничение механической обработки почвы и сохранение пожнивных остатков на поверхности почвы и т. д. могут иметь основополагающую роль в декарбонизации агроландшафтов (Бахмет и др., 2023). Многолетние травы и их травосмеси со злаковыми и бобовыми культурами – один из важнейших средоулучшающих ресурсов и восстановителей почвенного плодородия (Пуртова, Тимофеева, 2024). Включение их в сельскохозяйственные севообороты давно используется по многим причинам, роль многолетних трав и травосмесей в агроландшафтах весьма многогранна. Их использование способствует повышению коэффициента полезного потребления солнечной энергии, обогащению почв органическими соединениями и доступными для растений формами биофильных элементов (азот, фосфор, калий, кальций, магний), улучшению агрофизических, биологических и биохимических свойств почв и способствует уменьшению потерь органического вещества из почв при развитии эрозийных процессов (Пуртова, Тимофеева, 2024). Из всех сельскохозяйственных культур, многолетние травы обеспечивают наибольшее поступление в почву корневой массы. Использование многолетних бобово-злаковых травосмесей минимизирует необходимость применения минеральных азотных удобрений и увеличивает фотосинтетическую продуктивность агроценоза (Бахмет и др., 2023). Включение в севооборот почвопокровных культур показывает статистически значимую корреляцию увеличения содержания органического углерода ($C_{орг}$) с улучшением качества почвы, а именно, с уменьшением эрозии и увеличением содержания минерализуемого органического вещества. Полученная средняя величина связывания углерода покровными культурами составила 0,56 т С/га в год. Многовидовые смеси покровных культур показывают большее увеличение $C_{орг}$ в почвах по сравнению с моновидовыми покровными культурами. Использование посевов многолетних бобовых трав вызывает большую прибавку почвенного органического вещества, чем посевы многолетних злаковых трав (Кудеяров, 2022).

Учёт потоков парниковых газов и оценка углеродного баланса на землях сельскохозяйственного назначения не могут быть произведены в краткосрочных экспериментах, что связано с природной устойчивостью почвенного органического вещества, длительностью его формирования и сложностью строения. Длительные полевые опыты являются уникальными агрохимическими экспериментами, с помощью которых возможно динамическое моделирование выбросов и поглощения углерода. Мировой опыт свидетельствует, что стационарные эксперименты могут рассматриваться как источники независимых данных по оценке потоков углерода и азота (Сычев, Налиухин, 2021; Paul et al., 2015). Уникальными площадками для такого рода опытов могут стать «карбоновые полигоны» – территории для исследования биогеохимического цикла углерода в наиболее типичных экосистемах. Проект Минобрнауки по созданию карбоновых полигонов на территории Российской Федерации стартовал в начале 2021 г. (Карбоновые полигоны ..., 2021). Отдельным направлением данного проекта являются аграрные карбоновые полигоны, основные задачи которых – почвенные измерения, отработка технологий депонирования атмосферного углекислого газа в биомассе и почве, то есть секвестрация атмосферного углекислого газа за счет его перевода в углерод биомассы или почву. Предполагается, что именно эти технологии лягут в основу индустриальных природно-климатических проектов (Разработки российских ученых ..., 2022).

Задачи исследования включали: (1) общую характеристику истории землепользования и почв залежных полей, отведенных под полевые опыты на карбоновом полигоне «Покровский»; (2) обоснование методологии заложения полевого опыта; (3) оценку пространственной вариабельности запасов углерода, агрохимических и физических свойств гумусового горизонта почв экспериментальных участков; (4) оценку стартовых (до начала экспериментов) величин биологической активности почв.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Природные условия. Полигон «Покровский» расположен в центре Восточно-Европейской равнины, на границе Смоленской и Калужской областей, в среднем течении р. Угра (рис. 1).

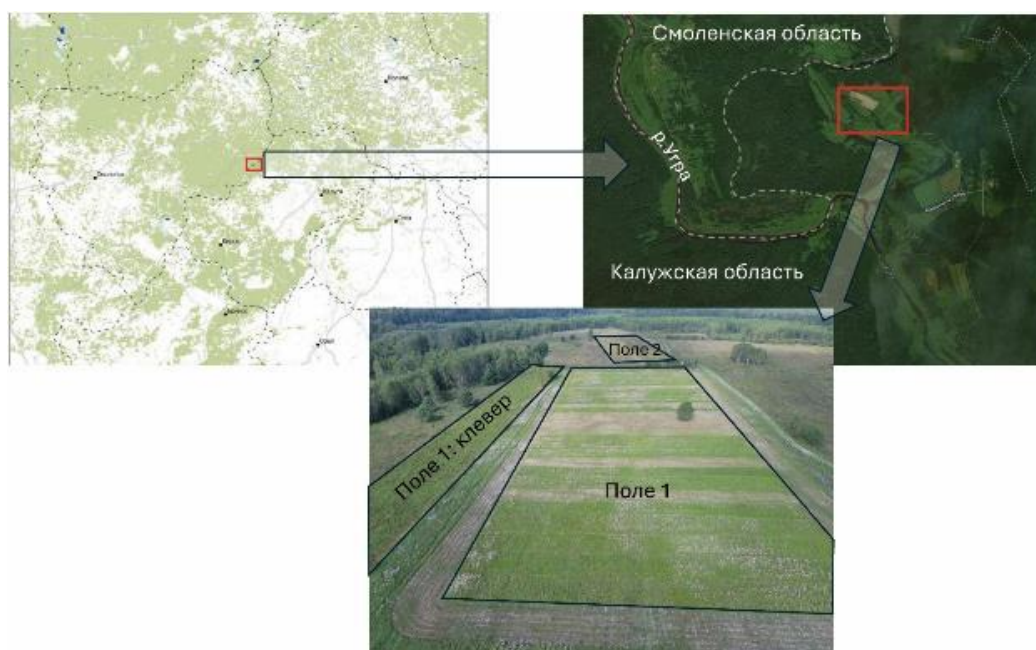


Рисунок 1. Расположение экспериментальных участков полигона «Покровский».

Климат территории умеренно-континентальный; среднегодовая температура воздуха – $+3,5^{\circ}$ – $+4,5^{\circ}$, среднегодовое количество осадков – 600–700 мм. Четвертичные породы представлены ледниковыми отложениями – моренными с гравием, галькой и валунами, частично перекрытые песками и супесями (Геологическая карта ..., 1998). Согласно зональному делению (Биоразнообразие биомов России ..., 2020) территория исследования расположена в пределах подзоны подтайги на границе ее северной и южной полосы; здесь произрастают ельники и сосняки бореальные и субнеморальные. Полигон расположен на пологом склоне юго-западной экспозиции к пойменной террасе р. Воря и представляет собой 2 крупных экспериментальных участка – Поле 1 и Поле 2, заложенных в пределах бывших с/х земель, вышедших из активного использования более 30 лет назад.

История землепользования. На основе изучения исторических картографических материалов XVIII–XX веков и современных космических снимков проведен анализ истории землепользования полигона. С конца XVIII века территория находилась в сельскохозяйственном обороте, при этом с середины XIX по середину XX века часть Поля 2 была занята деревней Ильмезьево. Деревня была разрушена в ходе Великой Отечественной войны (ВОВ) и ее территория включалась в сельскохозяйственный оборот до 1990-х годов. После распада СССР распашка территории прекратилась и поля постепенно заросли мелколиственной порослью деревьев. Поле 1 заросло к 2012 году, за исключением южной части экспериментальной площадки III. На Поле 2 за это время появились отдельно стоящие деревья. В 2017 году поля были расчищены от поросли, а Поле 2 распашано. К 2020 году Поле 1 повторно заросло мелколиственной порослью, на Поле 2, благодаря сельскохозяйственным мероприятиям, этого не происходило. В 2021 году Поле 1 было повторно расчищено и распашано (рис. 2).



Рисунок 2. История землепользования полей Полигона Покровский: А – Поле 1; Б – Поле 2.

Поле 1 имеет прямоугольное очертание со сторонами 150 на 300 м и вытянуто с юго-запада на северо-восток. В настоящее время на Поле 1 расположены 2 экспериментальные площадки. В 2023 году в юго-западной (нижней) части поля была заложена экспериментальная площадка с посадкой клевера лугового (*Trifolium pratense* L.) на площади 0,7 га (Поле 1_ клевер, рис. 3А).

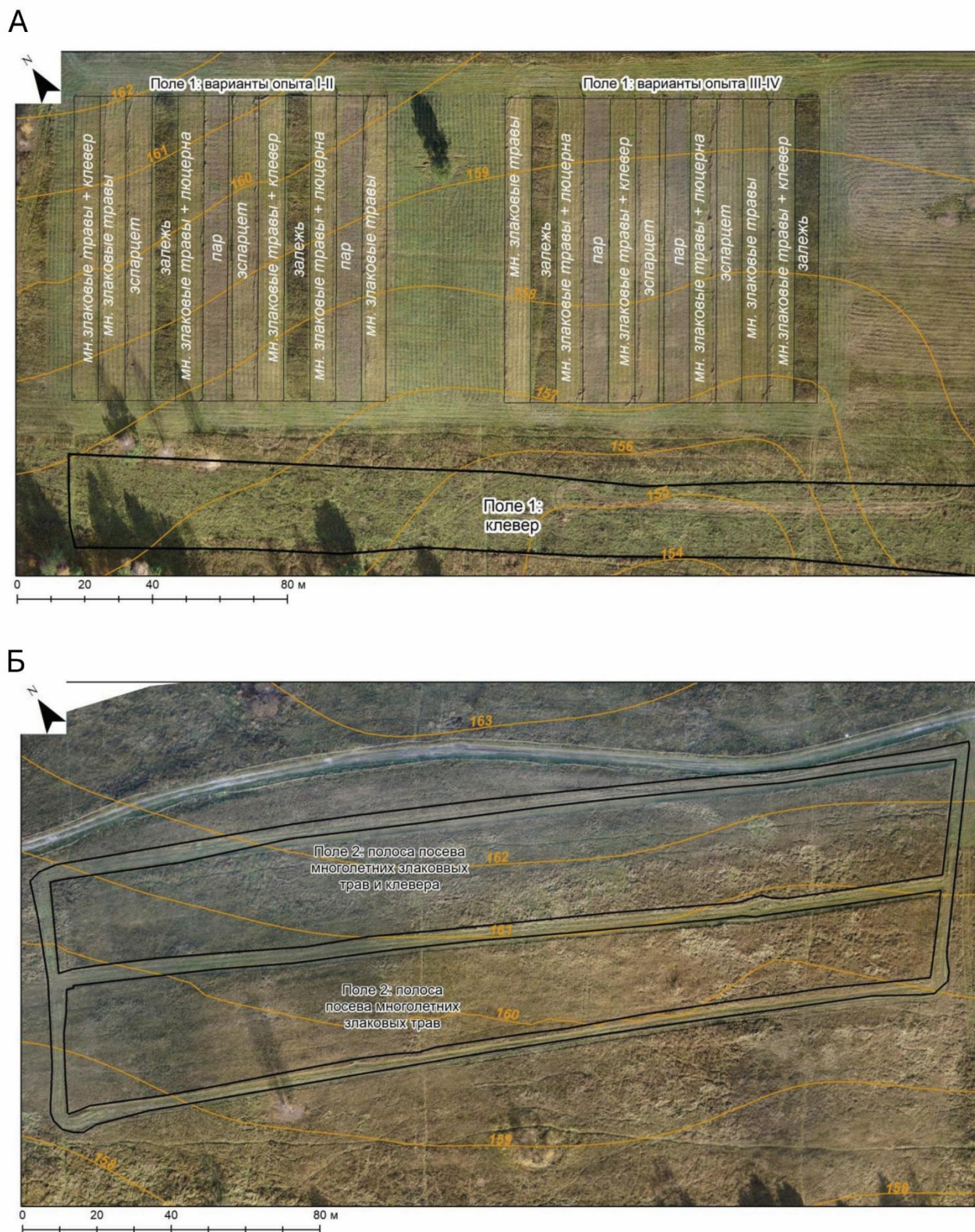


Рисунок 3. Экспериментальные площадки Поля 1 (А) и Поля 2 (Б).

Другая экспериментальная площадка на Поле 1 представляет собой однофакторный многолетний полевой опыт по изучению секвестрации CO_2 под многолетними бобово-злаковыми травосмесями, заложенный весной 2024 года на распаханной площади размером 250×100 м (рис. 3А).

Организация эксперимента. Было заложено шесть вариантов опыта в четырех повторениях, всего 24 делянки. Площадь одной опытной делянки составляет 630 м² (7×90 м), делянки разделены боковыми защитными полосами шириной 0,8 м, опыт ограничен концевыми защитными полосами шириной 15–20 м. Боковые защитные полосы выделяют вдоль длинных сторон делянок для исключения влияния растений соседних вариантов, концевые – для предохранения учетной части делянки от случайных повреждений. Между повторениями II и III организована защитная полоса около 30 м из-за растущей единичной сосны, что необходимо для исключения влияния кроны и корневой системы дерева на посевы. В каждом повторении опыта делянки размещены методом рандомизированных повторений (Доспехов, 1985). Схема полевого опыта представлена на рисунке 3А. В полевом опыте использованы двух- и многокомпонентные бобово-злаковые травосмеси, моновидовой посев эспарцета (табл. 1). Подбор культур осуществляли с учетом нескольких аспектов. Многолетние травы, используемые в полевом опыте, должны обеспечить покров почвы в течение всего периода вегетации. Кроме этого, многолетние бобовые травы (сем. Fabaceae) обогащают почву азотом, в условиях длительного вегетационного периода (весна +5°C и до поздней осени) защищают почву от эрозии, предохраняют от вымывания питательных веществ за пределы корнеобитаемого слоя, способствуют накоплению органического вещества в почве, дают значительное количество питательного корма для скота. В период вегетации многолетних бобовых трав в почве накапливается значительное количество азота: под клевером – 100–150 кг/га, под люцерной – до 300 кг/га (Эседуллаев, 2017; Шмелева, 2021). Многолетние злаковые травы (сем. Мятликовые – Poaceae) при кущении образуют значительное количество корней, которые после укоса надземной части остаются в почве и способствуют накоплению органического вещества, улучшают ее физические свойства за счет создания агрономически ценной структуры. При благоприятных условиях злаковые травы дают высокие урожаи в течение 5–10 лет выращивания на одном месте (Эседуллаев, 2017). При выращивании многолетних бобово-злаковых травяных смесей происходит объединение факторов их положительного влияния на почву в плане создания агрономически ценной структуры, накопления азота и органического вещества. В качестве контроля, т.е. условий, при которых секвестрация CO₂ не происходит в связи с отсутствием зеленой растительности, выбран пар. Залежь моделирует ситуацию постагрогенной сукцессии пахотных земель. Заращение ее происходит за счет диаспор, находящихся в почве и привноса семян с окружающей территории.

Таблица 1

Состав травосмесей, использованных для организации эксперимента на делянках Поля 1

Культура	Состав травосмесей	Доля культуры, %	Норма высева, кг/га
Многолетние злаковые травы	Кострец безостый – <i>Bromus inermis</i> Leyss.	30	40
	Фестулолиум – х <i>Festulolium</i>	20	
	Райграс пастбищный – <i>Lolium perenne</i> L.	30	
	Овсяница луговая – <i>Festuca pratensis</i> Huds.	20	
Многолетние злаковые травы + клевер луговой	Клевер луговой – <i>Trifolium pratense</i> L.	20	35
	Тимофеевка луговая – <i>Phleum pratense</i> L.	20	
	Овсяница луговая – <i>Festuca pratensis</i> Huds.	30	
	Райграс пастбищный – <i>Lolium perenne</i> L.	30	
Многолетние злаковые травы + люцерна посевная	Люцерна изменчивая – <i>Medicago sativa</i> L.	70	25
	Фестулолиум – х <i>Festulolium</i>	30	
Эспарцет	<i>Onobrychis</i> L. сорт Алтайский	100	90

Поле 2 расположено приблизительно в 300 метрах на северо-запад от Поля 1 и отделено от него лесозащитной полосой. Оно имеет прямоугольную форму со сторонами 80х250 м и также вытянуто с юго-запада на северо-восток как и Поле 1 (рис. 3Б). В 2023 году на Поле 2 были заложены две параллельные друг другу экспериментальные площадки 40х250 м. На северо-восточной половине (верхняя часть) Поля 2 осуществлен посев многолетних злаковых культур (*Phleum pratense*, *Festuca pratensis*, *Festuca arundinacea*, *Festulolium*) и клевера лугового (0,7 га) (Поле 2_клевер), на юго-западной половине (нижняя часть) были высеяны многолетние злаковые травы (0,65 га) (Поле 2_травы). Все посевы отгорожены от окружающей территории и между собой защитными полосами.

Таким образом, к полевому сезону 2024 года полигон «Покровский» представлял собой 2 экспериментальных поля: Поле 1 (площадью 2,32 га) с организованным на нем в 2024 году делянчным экспериментом (24 делянки) с различными вариантами посева многолетних трав и участком 2023 года, засеянным клевером (Поле 1_клевер) и Поле 2 (площадью 1,33 га) с двумя участками посева многолетних трав (Поле 2_травы, Поле 2_клевер), организованными в 2023 году.

Методы исследования. Для определения основных почвенных характеристик и отбора образцов почв на каждом из экспериментальных полей (Поле 1 и Поле 2) заложено по одному полнопрофильному почвенному разрезу в северо-западных углах каждого из полей, а также 50 прикопок на Поле 1 и 80 прикопок на Поле 2. Прикопки организовывались по регулярной сетке на всех экспериментальных участках примерно каждые 15 м. В каждой из прикопок даны описания верхних 2 почвенных горизонтов, измерена их мощность, определен гранулометрический состав «мокрым» методом (Качинский, 1965). Морфологическое описание почв проводили по Б.Г. Розанову (2004), название почв дано согласно «Классификация и диагностика почв России» (2004) и IUSS Working Group WRB (2022). Плотность сложения верхнего горизонта определяли буровым методом (Теории и методы физики ..., 2007). С глубины 10 см отобраны образцы гумусового горизонта почв. В лабораторных анализах использованы воздушно-сухие образцы почв, просеянные через сито с диаметром ячеек 2 мм. Определение величины pH (соотношение почвы и вода 1:2,5) проводили потенциометрически на pH-метре И-160 МИ (Россия) (ГОСТ 26423). Содержание органического углерода ($C_{орг}$) определяли титриметрически (метод Тюрина), содержание общего азота (Нобщ) – на автоматическом элементном CHNS-O анализаторе (EA 1110, PerkinElmer). Содержание аммонийной и нитратной форм азота определяли по ГОСТ (26489, 26951). Содержание подвижных соединений калия и фосфора определяли по методу Кирсанова.

Запасы углерода (т/га) в слое 0–20 см исследуемых почв определили по формуле 1:

$$\text{Запасы углерода в слое 0–20 см} = C_{орг} \times BD \times 20 \quad (1),$$

где $C_{орг}$ – содержание $C_{орг}$ в слое (%), BD – плотность почвы ($г/см^3$).

Температуру и объемную влажность почвы в слое 0–10 см определяли при помощи термозондов HI 98509 (HANNA, USA) и полевого влагомера FieldScout 100 (Spectrum, USA), соответственно. Эмиссию CO_2 измеряли методом закрытых камер (Смагин, 2005). Непрозрачные камеры объемом 850 мл и диаметром 10 см с герметичным клапаном для отбора проб, устанавливали на поверхность почвы с удаленной растительностью, заглубляя на 2–3 см. Газовые пробы CO_2 объемом 10–20 мл отбирали из камер в начальный момент времени и через 10 мин. Концентрацию CO_2 в пробе определяли на месте с помощью газового анализатора с инфракрасным датчиком LI-830 (LI-COR, USA). Эмиссионный поток рассчитывали исходя из предположения о линейности роста концентрации CO_2 в камере в период измерений и выражали в $мг\ C/м^2$ в ч. Все измерения проведены в 5-ти кратной повторности в течение 2-х дней для каждой из 24 делянок Поля 1 и в 10-ти кратной повторности на остальных трех опытных участках (Поле 1_клевер, Поле 2_клевер и Поле 2_травы+клевер; всего 150 измерений).

Карты пространственного распределения параметров составляли при помощи интерполяции методом кригинга в программе GoldenSoftware Surfer 21. Средние значения параметров и достоверность различий (при уровне значимости $p < 0,05$) оценивали методами однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA) и корреляционного анализа в программе Statistica 12.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Почвы экспериментальных участков. Почвы исследованной территории классифицированы как дерново-подзолистые постагрогенные (Классификация ..., 2004) и Albic Retisol (Aric) по IUSS Working Group WRB (2022). Этот тип почв имеет широкое распространение на данной территории (Бобровский, 2012). Существенное влияние на морфологический облик и свойства почв территории оказали интенсивная антропогенная деятельность и мозаичный характер почвообразующих пород. Следы деятельности человека, как правило, хорошо заметны по ровной границе между гумусовым (A_{Ура}) и нижележащим элювиальным (подзолистым) почвенным горизонтом (EL). Ее формирование обусловлено активной сельскохозяйственной деятельностью на данной территории, а именно, обработкой почвы плугом; по этой причине, при отсутствии каких-либо других воздействий, данная граница наблюдается на глубинах 25–30 см (глубина вспашки) (рис. 4).

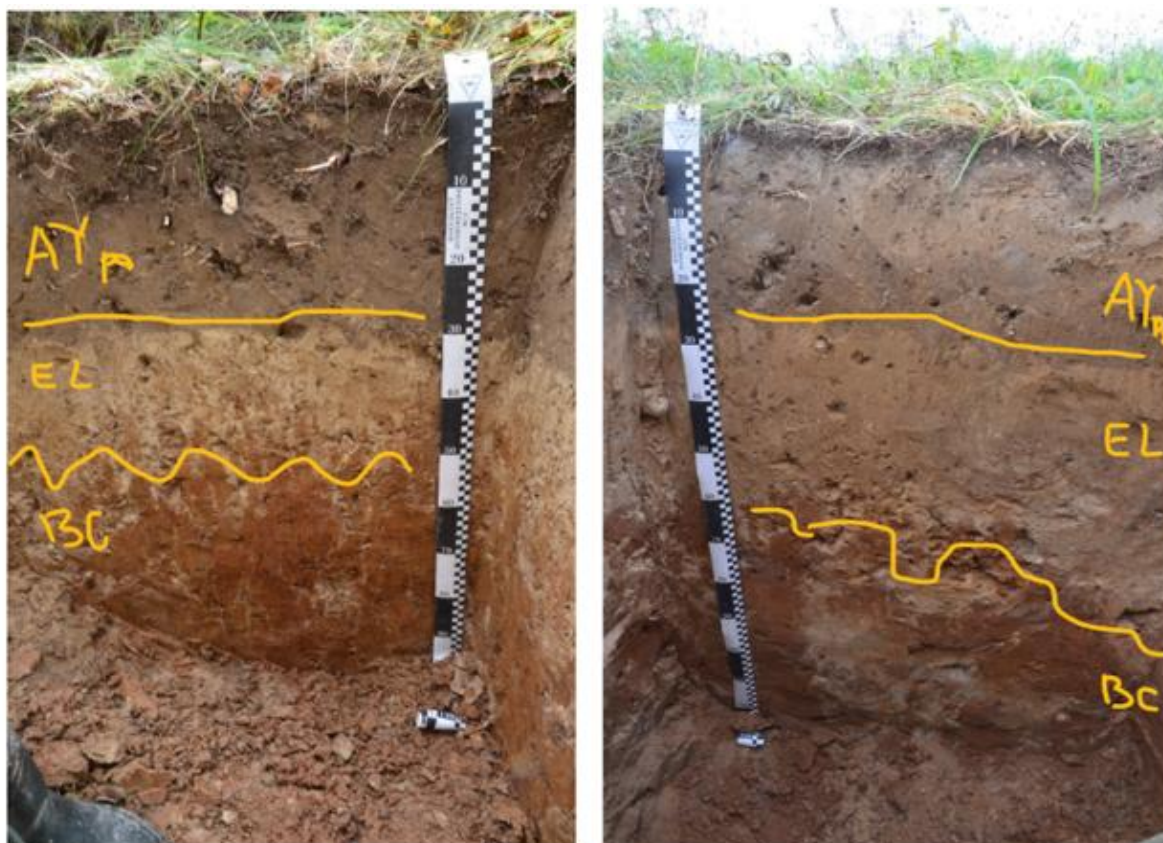


Рисунок 4. Дерново-подзолистая постагрогенная почва Поля 1 и Поля 2 – наиболее типичная почва Полигона.

В профиле дерново-подзолистой почвы на Поле 2 обращает внимание неоднородный характер сильнопереработанных флювиогляциальными процессами переходных к породе почвенных горизонтов. Это приводит к усложнению структуры почвенного покрова и усилению неоднородности почвенных свойств верхнего гумусового горизонта. Мощный и хорошо выраженный осветленный элювиальный горизонт EL свидетельствует о хорошем дренаже и выраженной элювиально-иллювиальной дифференциации несмотря на тяжелосуглинистый характер почвообразующих пород (морена), по-видимому, за счет их высокой опесчаненности. Мощный гумусовый слабоструктурный горизонт свидетельствует о благоприятных, в целом, условиях для гумусообразования и значимом вкладе в его морфологию антропогенного фактора. Детальный анализ морфологических параметров почв исследованных участков показал, что средняя мощность гумусового горизонта для обоих полей составляет 29,7 см и достоверно не отличается (30,6 и 28,6 см, Поле 1 и 2, соответственно) (табл. 2).

Таблица 2

Морфологические свойства гумусового горизонта почв экспериментальных Полей

Параметр	n	Среднее	Медиана	Минимум	Максимум	Нижний квартиль	Верхний квартиль	Стандартное отклонение
Поле 1								
Мощность, см	50	28,6	28,5	18,0	40,0	25,0	31,0	4,66
Плотность, г/см ³	50	1,23	1,23	1,01	1,41	1,19	1,28	0,09
Поле 2								
Мощность, см	59	30,6	30,0	21,0	46,0	26,0	35,0	5,37
Плотность, г/см ³	60	1,21	1,21	0,93	1,42	1,13	1,31	0,12

Общая неоднородность мощности гумусового горизонта для каждого из полей хорошо видна на карте (рис. 5А). Характерной закономерностью является приуроченность повышенной мощности гумусового горизонта к нижним (юго-восточным) частям склонов полей и может быть обусловлена эрозионными процессами смыва-намыва, а также наличием хорошо выраженного и мощного культурного слоя именно в нижних частях обоих полей (следы приусадебных участков урочища Ильмезьево, бывшего на этом месте до середины XX века).

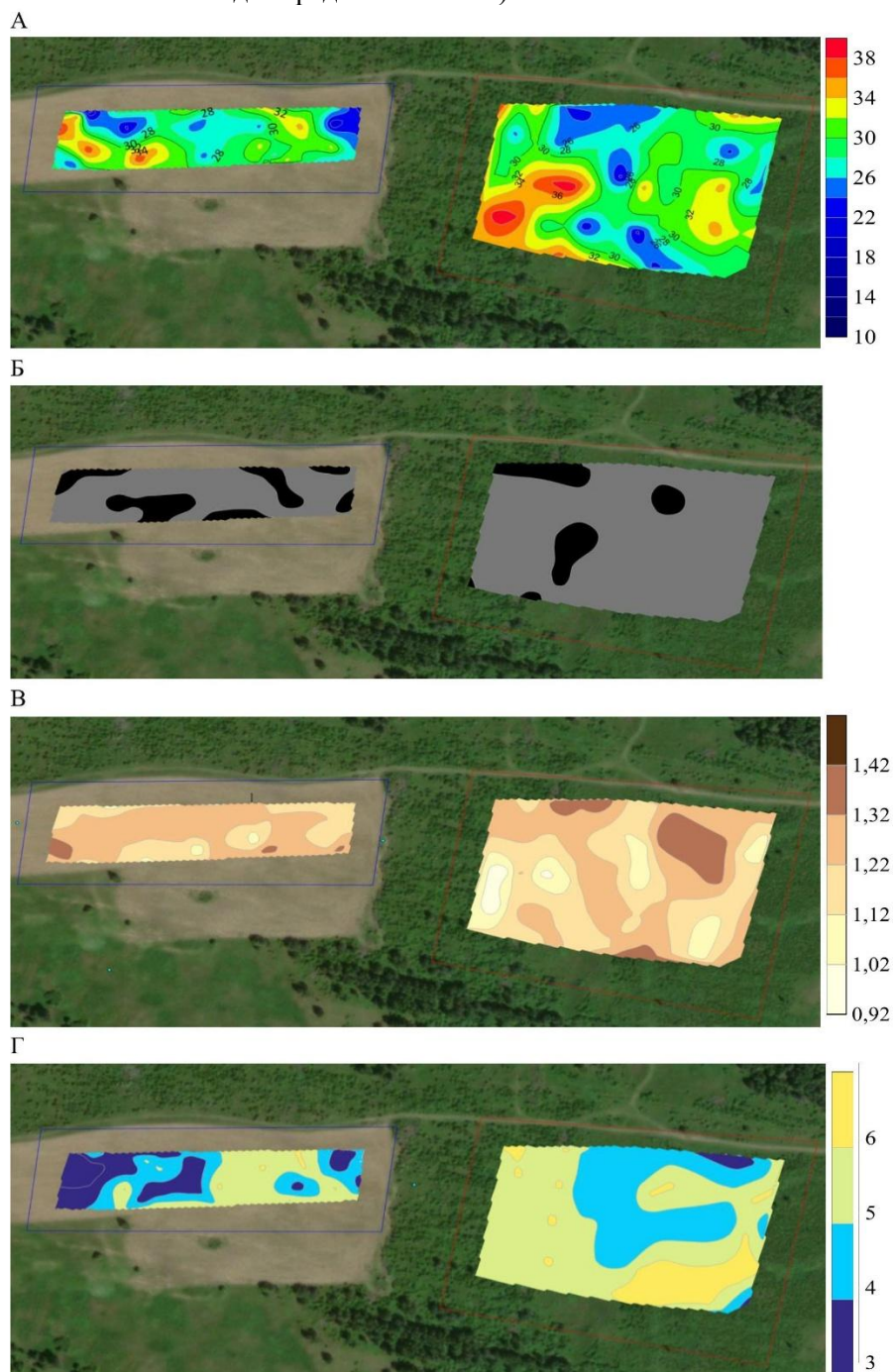


Рисунок 5. Картограммы свойств почв Поля 1 и Поля 2. А – мощность гумусового горизонта (см), Б – наличие/отсутствие горизонта EL (черный цвет – отсутствует, серый – есть), В – плотность гумусового горизонта (г/см³), Г – гранулометрический состав гумусового горизонта (3 – опесчаненный легкий суглинок, 4 – легкий суглинок, 5 – опесчаненный средний суглинок, 6 – средний суглинок).

О степени выраженности эрозионных процессов можно судить на основе картограммы (рис. 5Б). При постоянной распашке склонов происходит смыв верхних горизонтов почв и подпахивание срединных (вплоть до полного их исчезновения), особенно на возвышенных участках. Поле 2 более подвержено эрозионному смыву; в более чем 20% почв осветленный горизонт EL полностью

отсутствует, так как припахан к гумусовому горизонту. На Поле 1 площадь таких почв менее 6%. Подпахивание нижележащих горизонтов значительно снижает качество плодородного слоя и ухудшает свойства почв. Выраженность этого процесса на Поле 2 говорит о его более активном сельскохозяйственном использовании и более выраженных эрозионных процессах смыва поверхностных почвенных горизонтов.

Плотность сложения гумусового горизонта в среднем составляет $1,22 \text{ г/см}^3$ и не отличается между экспериментальными участками Поля 1 и Поля 2 ($1,23$ и $1,21 \text{ г/см}^3$, соответственно). Поле 1 более неоднородно, гумусовые горизонты верхней части имеют большую плотность, нижней – меньшую, что может быть связано с разным вкладом подпаханных срединных горизонтов, имеющих другую плотность, а также вкладом остатков окультуренных горизонтов, имеющих, как правило, пониженную плотность сложения (рис. 5В).

Гранулометрический состав почвенных горизонтов в основном представлен легким и средним суглинками разной степени опесчаненности (рис. 5Г). Значительная примесь песчаной фракции и преимущественно легкосуглинистый гранулометрический состав гумусового горизонта почв на Поле 2 свидетельствует о существенном нарушении почвенного профиля в результате антропогенной и эрозионной переработки и подпахивания нижележащих горизонтов, имеющих на многих участках супесчаный и песчаный гранулометрический состав с обильными включениями обломочного материала разного размера. На ряде участков в северо-западной части Поля 2 отмечены значительные включения мелкообломочного материала и гальки непосредственно на поверхности почв. Гумусовый горизонт Поля 1 более однороден по гранулометрическому составу и преимущественно среднесуглинистого состава (опесчаненного).

Свойства гумусового горизонта почв экспериментальных полей на момент старта экспериментов. Несмотря на некоторые отличия в морфологии, свойства почв экспериментальных участков Поле 1 и Поле 2 примерно схожи. Гумусовые горизонты Поля 1 более плодородны, мощнее и менее плотны, однако ни по одному из вышеуказанных параметров по результатам дисперсионного анализа достоверно не отличаются от свойств гумусового горизонта Поля 2 (табл. 3).

Таблица 3

Общие свойства и основные агрохимические показатели гумусового горизонта почв экспериментальных полей

Параметр	<i>n</i>	Среднее	Медиана	Минимум	Максимум	Нижний квартиль	Верхний квартиль	Стандартное отклонение
Поле 1								
pH _{водн}	20	6,1	6,1	5,8	6,6	5,8	6,2	0,3
C _{орг} , %	120	1,5	1,5	1,3	1,7	1,4	1,7	0,2
N _{общ} , %	20	0,14	0,15	0,10	0,17	0,12	0,16	0,02
*P ₂ O ₅	20	116,8	115,5	73,00	185,0	92,00	132,0	32,3
*K ₂ O	20	80,7	80,0	55,0	123	72,0	91,0	19,5
*N-NH ₄	20	5,0	4,7	4,3	6,7	4,5	5,3	0,8
*N-NO ₃	20	<2,8	–	–	–	–	–	–
Поле 2								
pH _{водн}	20	5,8	5,7	5,3	6,5	5,6	6,0	0,3
C _{орг} , %	20	1,7	1,7	1,3	2,1	1,6	1,9	0,2
N _{общ} , %	20	0,15	0,14	0,10	0,21	0,12	0,17	0,03
*P ₂ O ₅	20	145,0	112,0	48,90	455,0	75,50	180,0	105,2
*K ₂ O	20	72,8	75,5	41,1	115	61,5	82,0	18,8
*N-NH ₄	20	5,9	5,2	3,5	15,9	4,8	5,9	2,7
*N-NO ₃	20	<2,8	–	–	–	–	–	–

Примечание.

* Агрохимические показатели гумусового горизонта почв представлены в мг/кг.

Пространственное распределение содержания гумуса хорошо отражают локальные особенности почв Полей. Так, для почв Поля 2 характерны большие величины в нижней части (южной), что хорошо согласуется с отмеченным выше вкладом эрозионных процессов (смывом верхнего горизонта), а также наличием в этой части Поля 2 остатков культурного слоя (с высоким содержанием гумуса) (рис. 6).

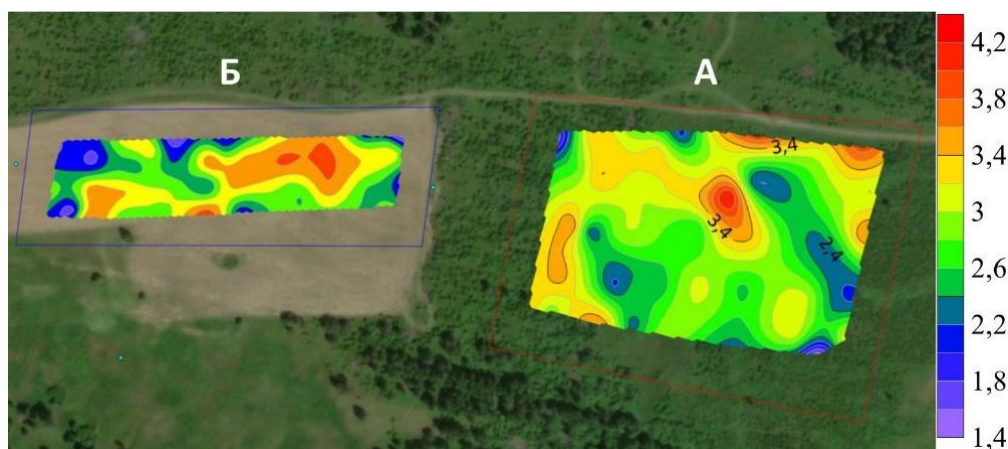


Рисунок 6. Стартовое содержание гумуса (%) в почвах Поля 1 (А) и Поля 2 (Б), октябрь 2023 г.

Полученные предварительные результаты позволяют оценить стартовые запасы углерода в почвах экспериментальных участков полигона. Они составляют в слое 0–20 см 41,3 т/га для Поля 1 и 38,3 т/га для Поля 2. В целом, полученные данные показали, что, согласно грациям (Орлов, 1985), содержание органического вещества в почвах обоих полей низкое (табл. 3). Согласно грациям (Прожорина, Затулей, 2009), почвы гумусовых горизонтов обоих полей относятся к слабокислым ($pH_{водн}$ 5,5–6,5). Показатели содержания валового азота в почвах Поля 1 и 2 соответствуют средним значениям для дерново-подзолистых почв согласно грациям, описанным в работе (Минеев, 2006).

Для изученных почв обнаружена высокая неоднородность по содержанию доступного фосфора в почвах Поля 2. Вариабельность содержания доступного фосфора составляет от 40 мг/кг, что соответствует низкому уровню обеспеченности, до 250 мг/кг – что находится на границе очень высокой обеспеченности. Почвы Поля 1 более однородны по этому показателю; в почвах Поля 1 его содержание изменяется от 84 до 148 мг/кг почвы, что соответствует средним значениям обеспеченности. Значения содержания подвижного калия в почве Поля 1 распределены равномерно и соответствуют нижней границе средней обеспеченности по этому свойству. Для почв Поля 2 содержание подвижного калия изменяется сильнее – от 54 до 90 мг/кг, однако эти показатели укладываются в грацию средней обеспеченности (Ягодин, 1989). Таким образом, дерново-подзолистая почва экспериментальных полей характеризуется средней степенью обеспеченности питательными веществами с высокой степенью неоднородности.

Гидротермические показатели и биологическая активность почв на старте эксперимента.

Контрольное (стартовое) изучение биологической активности почв проведено в конце мая 2024 года, через 2 недели после подготовки Поля 1 к посеву (вспашка и боронование в два следа) и разбивки поля на опытные делянки. На Поле 1 (вегетационный опыт) в этот момент растительный покров полностью отсутствовал, на других участках растительный покров был хорошо развит. К концу мая температура верхнего горизонта почвы была выше 20°C на большей части полигона, средние значения $21,9 \pm 3,1^\circ\text{C}$ ($n=150$). По результатам дисперсионного анализа значимо по температуре отличался только экспериментальный участок Поле 1_клевер существенно более низкими температурами по сравнению с другими участками (рис. 7), что очевидно связано с затенением поверхности почвы посадками клевера (2023 года) и близкорасположенным лесным массивом. Исходя из значений объемной влажности, средние значения которой составили $11,0 \pm 4,1\%$ ($n=150$), можно констатировать, что в этот период влагообеспеченность почвы была низкой. Значимо отличается от других только экспериментальный участок Поле 2_клевер минимальными значениями влажности. Средняя величина эмиссии CO_2 участков с растительностью и без составила $155 \pm 80 \text{ мг C}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ ($n=150$), что соответствует значениям в пик вегетационного сезона для подобных экосистем (Лопес де Гереню и др., 2018). Данное обстоятельство обусловлено высокими температурами почв и воздуха в период измерений (конец мая) и теплой весной в целом. По величине эмиссии объекты значимо разделяются на участки без растительности и с посадками клевера и трав (рис. 7).

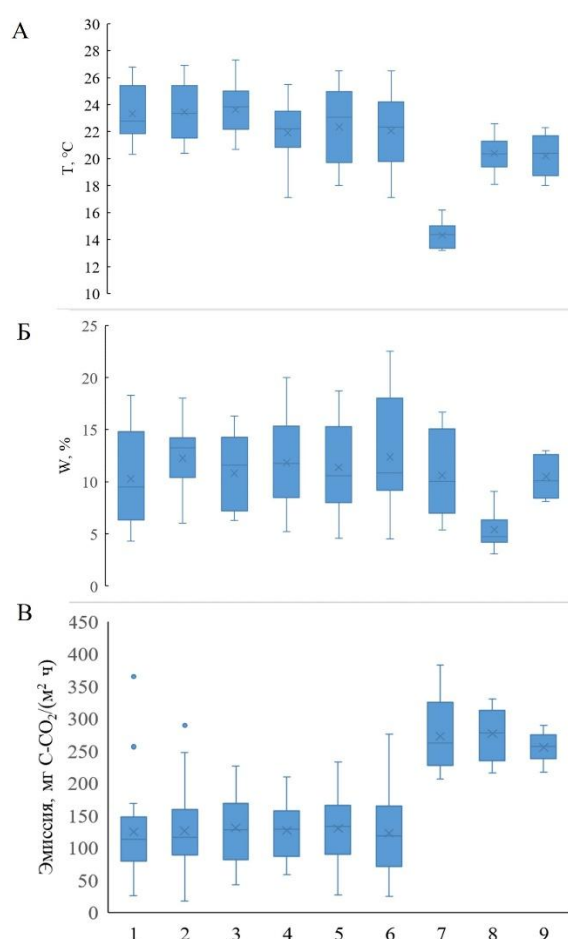


Рисунок 7. Температура (А), объемная влажность почв (Б) и эмиссия CO_2 (В) с поверхности почв экспериментальных участков. Показаны средние, медианы, межквартильный размах, минимум, максимум и выбросы. Варианты опыта Поля 1: 1 – многолетние злаковые травы + клевер, 2 – многолетние злаковые травы, 3 – эспарцет, 4 – залежь, 5 – многолетние злаковые травы + люцерна, 6 – пар, 7 – клевер, Поля 2: 8 – многолетние злаковые травы + клевер, 9 – многолетние злаковые травы.

Рассмотрим варьирование показателей на участке полевого опыта Поля 1. Температура поверхности почв в дни измерений (конец мая) изменялась на всей экспериментальной площади в очень широких пределах, разница между минимальной и максимальной температурой составила почти 10°C (табл. 4). Несмотря на большой разброс температуры почвы, в целом варьирование данного параметра невысокое, о чем свидетельствует низкий коэффициент вариации (табл. 4). Существенно сильнее изменяется объемная влажность почвы, а максимальная вариабельность установлена для величины эмиссии CO_2 .

Таблица 4

Гидротермические параметры и эмиссия CO_2 с поверхности почв экспериментальных участков Поля 1 и Поля 2

Параметр	<i>n</i>	Среднее	Медиана	Минимум	Максимум	Стандартное отклонение	Коэффициент вариации
Т почвы, $^\circ\text{C}$	120	22,8	22,8	17,1	27,3	2,3	10
Влажность почвы, %	120	11,5	11,4	4,3	22,5	4,1	36
Эмиссия CO_2 , мг $\text{C}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$	120	127	120	17	364	60	47

По результатам дисперсионного анализа можно констатировать, что в весенний период, до посева культур, делянки шести вариантов закладываемого полевого опыта на Поле 1 не различались значимо по таким показателям как температура и влажность почвы, эмиссия CO_2 . Колебания средних

значений температуры между вариантами опыта составляет 1–2°C, влажности – 1%, эмиссии – 1–8 мг С/(м²·ч), т.е. крайне малы. Данное обстоятельство считаем чрезвычайно важным, т.к. можно предположить, что изменения в параметрах в ходе будущего опыта будут определяться исключительно различиями агротехнических мероприятий и влиянием культур, а не природным варьированием почвенных свойств. Величину эмиссии СО₂ с поверхности почвы распаханых участков Поля 1, вероятно, можно принять за фоновое значение почвенного гетеротрофного дыхания (без вклада автотрофного дыхания корневых систем) при данных условиях. Вклад корневого дыхания, рассчитанный нами исходя из полученных данных, составляет чуть больше 50%.

Проведенный корреляционный анализ (отдельно для опыта 2024 г. без растительности, $n=120$ и с посадками 2023 года, $n=30$) выявил слабую значимую связь величины эмиссии с температурой для участков без растительности и слабую незначимую положительную связь эмиссии с влажностью для участков с растительностью; небольшая корреляционная связь объясняется невысокой вариабельностью свойств.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, к лету 2024 года на карбоновом полигоне «Покровский» имеется четыре экспериментальных участка, располагающихся на двух полях. Три участка организованы в начале 2023 года: монодоминантная посадка клевера лугового (Поле 1 клевер), смесь многолетних злаковых культур и клевера лугового (Поле 2 клевер) и многолетние злаковые культуры (Поле 2 травы). На четвёртом участке в конце весны 2024 года заложен однофакторный полевой деляночный опыт с многолетними бобово-злаковыми смесями (6 вариантов). Подбор культур для вегетационного опыта осуществлялся с учетом их физиологических особенностей и влияния на секвестрацию углерода почвами.

Площадные морфологические и химические исследования свойств почв полей показали их идентичность (отсутствие статистически значимых отличий) по содержанию гумуса и агрохимическим показателям в начальный момент эксперимента, несмотря на широкое варьирование свойств. Агродерново-подзолистые почвы экспериментальных полей характеризуются низкими запасами гумуса и средней степенью обеспеченности питательными элементами с высокой степенью варьирования показателей. Запасы углерода в слое 0–20 см составляют 41,3 т/га для Поля 1 и 38,3 т/га для Поля 2. Установлено, что в весенний период, до посева культур, повторности закладываемого полевого опыта не различались значимо по таким показателям как температура и влажность почвы, эмиссия СО₂. Идентичности удалось достичь за счет рандомного расположения повторностей опыта и ориентацией участков с учетом неоднородности полей, обусловленной историей землепользования и особенностями рельефа. Можно предположить, что изменения в параметрах углеродного цикла в ходе опыта будут определяться исключительно различиями агротехнических мероприятий и влиянием культур, а не природным варьированием почвенных свойств. За счет наличия разновозрастных посевов был оценен вклад корневого дыхания в эмиссию СО₂, который составил около 50% на пике вегетации для злаковых смесей и бобовых культур. В дальнейших исследованиях планируется мониторинг запасов почвенного углерода, а также круглогодичная оценка таких параметров углеродного цикла как почвенное дыхание, экосистемное дыхание, запас надземной и подземной фитомассы и другие.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны руководителю проекта «Карбоновый полигон «Покровский» НИУ ВШЭ» А.Ю. Иванову за организационную поддержку при проведении исследований, критические замечания, высказанные при подготовке статьи к печати.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена за счет средств субсидий Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на выполнение государственного задания НИУ ВШЭ в рамках «Программы создания и функционирования карбонового полигона в Калужской, Московской и Кировской областях».

ЛИТЕРАТУРА

Бахмет О.Н., Евстратова Л.П., Николаева Е.В., Канцерова Л.В., Дубина-Чехович Е.В. Оценка растительного покрова при анализе бюджета углерода в агроландшафтах Карелии // Вестник российской сельскохозяйственной науки. 2023. № 6. С. 55–60. <https://doi.org/10.31857/2500-2082/2023/6/55-60>

- Биоразнообразие биомов России. Равнинные биомы / Огуреева Г.Н., Леонова Н.Б., Микляева И.М., Бочарников М.В., Федосов В.Э., Мучник Е.Э., Урбанавичюс Г.П., Емельянова Л.Г., Хляп Л.А., Румянцев В.Ю., Кузиков И.В., Липка О.Н., Архипова М.В., Булдакова Е.В., Кадетов Н.Г. / Под ред. Г.Н. Огуреевой. Москва: ФГБУ «ИГКЭ», 2020. 623 с.
- Битва за климат: карбоновое земледелие как ставка России. Экспертный доклад / Под ред. А.Ю. Иванова, Н.Д. Дурманова. Москва: Изд. дом Высшей школы экономики, 2021. 120 с. <https://doi.org/10.17323/978-5-7598-2519-7>
- Бобровский М.В. Государственный природный заповедник Калужские засеки // Почвы заповедников и национальных парков Российской Федерации. Москва: НИА-Природа – Фонд Инфосфера, 2012. С. 105–107.
- Геологическая карта четвертичных отложений Калужской области. Масштаб 1:500000. Министерство природных ресурсов Российской Федерации, Центральный региональный геологический центр, межрегиональный центр по геологической картографии, 1998.
- Доспехов Б.А. Методика полевого опыта. Москва: Агропромиздат, 1985. 351 с.
- Карбоновые полигоны. Министерство науки и высшего образования Российской Федерации. 2021. [Электронный ресурс]. URL: https://minobrnauki.gov.ru/action/poligony/index.php?sphrase_id=108077 (дата обращения 07.02.2022).
- Качинский Н.А. Физика почв. Москва: Высшая школа, 1965. Том 1. 323 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.
- Кудеяров В.Н. Современное состояние углеродного баланса и предельная способность почв к поглощению углерода на территории России // Почвоведение. 2015. № 9. С. 1049–1060. <https://doi.org/10.7868/S0032180X15090087>
- Кудеяров В.Н. Секвестрация углерода в почве: факты и проблемы (аналитический обзор) // Успехи современной биологии. 2022. Том 142. № 6. С. 545–559. <https://doi.org/10.31857/S0042132422060047>
- Кудеяров В.Н., Заварзин Г.А., Благодатский С.А., Борисов А.В., Воронин П.Ю., Демкин В.А., Демкина Т.С., Евдокимов И.В., Залодчиков Д.Г., Карелин Д.В., Комаров А.С., Курганова И.Н., Ларионова, А.А., Лопес де Греню В.О., Уткин А.И. Пулы и потоки углерода в наземных экосистемах России. Москва: Наука, 2007. 315 с.
- Лопес де Гереню В.О., Курганова И.Н., Хорошаев Д.А. Влияние контрастных режимов увлажнения на эмиссию CO₂ из серой лесной почвы под сеяным лугом и чистым паром // Почвоведение. 2018. № 10. С. 1244–1258. <https://doi.org/10.1134/S0032180X18100039>
- Минеев В.Г. Агрохимия. Москва: МГУ, 2006. 720 с.
- Орлов Д.С. Химия почв. Москва: МГУ, 1985. 376 с.
- Прожорина Т.И., Затулей Е.Д. Химический анализ почв. Часть 2. Москва: Издательско-полиграфический центр МГУ, 2009. 30 с.
- Пуртова Л.Н., Тимофеева Я.О. Содержание, запасы гумуса и биологическая активность агротемногумусовых подбелов Приморского края // Плодородие. 2024. № 4(139). С. 64–67. <https://doi.org/10.25680/S19948603.2024.139.14>
- Разработки российских ученых помогают развивать карбоновые полигоны. Министерство науки и высшего образования Российской Федерации. 2022. [Электронный ресурс]. URL: <https://minobrnauki.gov.ru/press-center/news/nauka/57285/> (дата обращения 18.04.2025).
- Розанов Б.Г. Морфология почв: учебник для высшей школы. Москва: Академический проект, 2004. 432 с.
- Семенов В.М., Когут Б.М. Почвенное органическое вещество. Москва: ГЕОС, 2015. 233 с.
- Смагин А.В. Газовая фаза почв. Москва: МГУ, 2005. 301 с.
- Соколов М.С., Глинушкин А.П., Спиридонов Ю.Я., Торопова Е.Ю., Филипчук О.Д. Технологические особенности почвозащитного ресурсосберегающего земледелия (в развитие концепции ФАО) // Агрохимия. 2019. № 5. С. 3–20. <https://doi.org/10.1134/S000218811905003X>
- Сычев В.Г., Налиухин А.Н. Изучение потоков углерода и азота в длительных полевых опытах геосети с целью снижения выбросов парниковых газов и повышения депонирования диоксида углерода агроценозами // Плодородие. 2021. № 6(123). С. 38–41. <https://doi.org/10.25680/S19948603.2021.123.10>
- Теории и методы физики почв / Шеин Е.В., Карпачевский Л.О., Архангельская Т.А., Банников М.В. и др.; отв. ред. Е.В. Шеин и Л.О. Карпачевский. Москва: «Гриф и К», 2007. 616 с.

Шмелева Н.В. Роль нетрадиционных кормовых культур в воспроизводстве и повышении плодородия дерново-подзолистых почв Верхневолжья // Владимирский земледелец. 2021. № 2(96). С. 47–52. <https://doi.org/10.24412/2225-2584-2021-2-47-52>

Эседуллаев С.Т. Формирование травостоев на основе люцерны изменчивой на дерново-подзолистых почвах Верхневолжья // Зернобобовые и крупяные культуры. 2017. № 2(22). С. 121–126.

Ягодин Б.А. Агрохимия Москва: Агропромиздат, 1989. 639 с.

Paul E.A., Kravchenko A., Grandy A.S., Morris S. Soil organic matter dynamics: Controls and management for sustainable ecosystem functioning / S.K. Hamilton, J.E. Doll, G.P. Robertson (Eds). The Ecology of Agricultural Landscapes: Long-Term Research on the Path to Sustainability. New York: Oxford University Press, 2015. P. 104–134.

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.

Поступила в редакцию 27.06.2025

Принята 08.09.2025

Опубликована 19.09.2025

Сведения об авторах:

Матышак Георгий Валерьевич – кандидат биологических наук, эксперт, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Центр технологического трансфера (Москва, Россия); matyshak@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0008-6428-9639>

Архипова Мария Владимировна – кандидат географических наук, эксперт, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Центр технологического трансфера (Москва, Россия); masha-a@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6196-8398>

Дурманов Николай Дмитриевич – заместитель директора Центра технологического трансфера ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (Москва, Россия), durmanov@postman.ru; <https://orcid.org/0009-0008-6622-7271>

Гончарова Ольга Юрьевна – кандидат биологических наук, эксперт, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Центр технологического трансфера (Москва, Россия); goncharovaoy@my.msu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1099-251X>

Кондрашкина Марина Иосифовна – кандидат биологических наук, доцент, эксперт, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Центр технологического трансфера (Москва, Россия); kondra_mar@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7180-5119>

Корденков Сергей Николаевич – заместитель директора Центра технологического трансфера ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (Москва, Россия); Skordenkov@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0004-3490-5286>

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.



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

Carbon polygon (test site) "Pokrovsky": methodological aspects of setting up a field experiment to assess the impact of perennial forage grasses on carbon sequestration by soils of agroecosystems

© 2025 G. V. Matyshak , M. V. Arkhipova , N. D. Durmanov , O. Ju. Goncharova , M. I. Kondrashkina , S. N. Kordenkov 

National Research University Higher School of Economics, Myasnitskaya st., building 20b, Moscow, Russia. E-mail: matyshak@gmail.com

The aim of the study was to assess the main characteristics of the land use history and soil properties of fallow areas allocated for experimental plots at the “Pokrovsky” carbon test site and justify of the methodology for arranging a field experiment.

Location and time of the study. The study was conducted in the experimental fields of the “Pokrovsky” test site, located in the center of the East European Plain, on the border of the Smolensk and Kaluga regions in the middle reaches of the Ugra River in 2023–2024.

Methods. The study involved description of the of land use history based on historical cartographic materials, detailed mapping of the soil cover of the site, assessing the chemical, physical, agrochemical properties of soils using common methods, as well as assessing their biological activity by measuring CO₂ emissions from the soil surface using the chamber method.

Results. Agricultural sod-podzolic soils of the experimental fields were characterized by low humus storage and an average nutrient supply with high degree variation. Carbon storage in the 20 cm layer was 38,3 and 41,3 t/ha for the two experimental fields, used in the study. It was found that in spring, before sowing crops, the soil replicates in both experimental field did not differ significantly in such indicators as temperature, moisture, CO₂ emission. The contribution of root respiration to CO₂ emission was about 50% at the peak of vegetation for cereal mixtures and legumes.

Conclusions. By the summer of 2024 the “Pokrovsky” carbon test site had four experimental plots located on two fields. Three plots were set up at the beginning of 2023: monodominant planting of red clover, a mixture of perennial cereal crops and red clover, and perennial cereal crops. At the fourth site, at the end of spring 2024, a single-factor field plot experiment was established with perennial legume-cereal mixtures selected taking into account their physiological characteristics and impact on carbon sequestration, on plots identical in chemical and biological properties.

Keywords: sod-podzolic soils; carbon polygon; field plot experiment; ground cover crops; carbon sequestration; CO₂ emission.

How to cite: Matyshak G.V., Arkhipova M.V., Durmanov N.D., Goncharova O.Ju., Kondrashkina M.I., Kordenkov S.N. Carbon polygon (test site) “Pokrovsky”: methodological aspects of setting up a field experiment to assess the impact of perennial forage grasses on carbon sequestration by soils of agroecosystems. *The Journal of Soils and Environment*. 2025. 8(3). e318. DOI: [10.31251/pos.v8i3.318](https://doi.org/10.31251/pos.v8i3.318) (in Russian with English abstract).

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors are grateful to the head of the project “Pokrovsky Carbon Test Site of the National Research University Higher School of Economics” A.Yu. Ivanov for organizational support during the research and critical comments made during the preparation of the article for publication.

FUNDING

The work was carried out using subsidies from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for the implementation of a state assignment to the National Research University Higher School of Economics within the framework of the “Program for the creation and operation of a carbon testing ground in the Kaluga, Moscow and Kirov regions.”

REFERENCES

- Bakhmet O.N., Evstratova L.P., Nikolaeva E.V., Kantserova L.V., Dubina-Chekhovich E.V. Assessment of vegetation cover when analyzing the carbon budget in agricultural landscapes of Karelia. *Vestnik of the Russian agricultural sciences*. 2023. No. 6. P. 55–60. (in Russian). <https://doi.org/10.31857/2500-2082/2023/6/55-60>
- Biodiversity of biomes in Russia. Plain biomes / Ogureeva G.N., Leonova N.B., Miklyaeva I.M., Bocharnikov M.V., Fedosov V.E., Muchnik E.E., Urbanavichyus G.P., Emel yanova L.G., Khlyap L.A., Rummyantsev V.Yu., Kuzikov I.V., Lipka O.N., Arkhipova M.V., Buldakova E.V., Kadetov N.G. / Ed. G.N. Ogureeva. Moscow: FGBU «IGKE», 2020. 623 p. (in Russian).
- Battle for the Climate: Carbon Farming as Russia's Bet. Expert Report / Edited by A.Y. Ivanova, N.D. Durmanova. Moscow: Publishing house of the Higher School of Economics, 2021. 120 p. (in Russian). <https://doi.org/10.17323/978-5-7598-2519-7>
- Bobrovsky M.V. State Nature Reserve Kaluga Zaseki. In book: *Soils of Nature Reserves and National Parks of the Russian Federation*. Moscow: NIA-Priroda – Infosfera Fund, 2012. P. 105–107. (in Russian).
- Geological map of Quaternary deposits of the Kaluga region. Scale 1:500000. Ministry of Natural Resources of the Russian Federation, Central Regional Geological Center, Interregional Center for Geological Cartography, 1998. (in Russian).

- Dospekhov B.A. Methods of field experiment. Moscow: Agropromizdat, 1985. 351 p. (in Russian).
- Carbon polygons. Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation. 2021. [Electronic resource]. URL: https://minobrnauki.gov.ru/action/poligony/index.php?sphrase_id=108077 (accessed on 07.02.2022). (in Russian).
- Kachinsky N.A. Physics of soils. Moscow: Higher School, 1965. Vol. 1. 323 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).
- Kudeyarov V.N. Current state of the carbon budget and the capacity of Russian soils for carbon sequestration. Eurasian Soil Science. 2015. Vol. 48. No. 9. P. 923–933. <https://doi.org/10.1134/S1064229315090070>
- Kudeyarov V.N. Soil Carbon Sequestration: Facts and Challenges (Analytical Review). Uspehi sovremennoj biologii. 2022. Vol. 142. No. 6. P. 545–559. (in Russian). <https://doi.org/10.31857/S0042132422060047>
- Kudeyarov V.N., Zavarzin G.A., Blagodatsky S.A., Borisov A.V., Voronin P.Yu., Demkin V.A., Demkina T.S., Evdokimov I.V., Zamolodchikov D.G., Karelin D.V., Komarov A.S., Kurganova I.N., Larionova A.A., Lopes de Grenu V.O., Utkin A.I. Pools and Flows of Carbon in Terrestrial Ecosystems of Russia. Moscow: Nauka Publ., 2007. 315 p. (in Russian).
- Lopes de Gerenyu V.O., Kurganova I.N., Khoroshaev D.A. The Effect of Contrasting Moistening Regimes on CO₂ Emission from the Gray Forest Soil under a Grass Vegetation and Bare Fallow. Eurasian Soil Science. 2018. Vol. 51. No. 10. P. 1200–1213. <https://doi.org/10.1134/S1064229318100034>
- Mineev V.G. Agrochemistry. Moscow: Moscow State University, 2006. 720 p. (in Russian).
- Orlov D.S. Chemistry of soils. Moscow: Moscow State University, 1985. 376 p. (in Russian).
- Prozhorina T.I., Zatul'ei E.D. Chemical analysis of soils. Part 2. Moscow: Publishing and Printing Center of Moscow State University, 2009. 30 p. (in Russian).
- Purtova L.N., Timofeeva Y.O. The humus content, reserve of humus and biological activity of planosols from Primorskii Region under the phytomeliorative experiment. Plodorodie. 2024. No. 4(139). P. 64–67. (in Russian). <https://doi.org/10.25680/S19948603.2024.139.14>
- Russian scientists' developments help expand carbon polygons Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation. 2025. [Electronic resource]. URL: <https://minobrnauki.gov.ru/press-center/news/nauka/57285/> (accessed on 18.04.2025). (in Russian).
- Rozanov B.G. Morphology of soils: a textbook for higher school. Moscow: Akademicheskii proekt Publ., 2004. 432 p. (in Russian).
- Semenov V.M., Kogut B.M. Soil organic matter. Moscow: GEOS, 2015. 233 p. (in Russian).
- Smagin A.V. Gas phase of soils. Moscow: Moscow State University, 2005. 301 p. (in Russian).
- Sokolov M.S., Glinushkin A.P., Spiridonov Yu.Ya., Toropova E.Yu., Filipchuk O.D. Technological Features of Soil-Protecting Resource-Saving Agriculture (in Development of the FAO Concept). Agrokhimia. 2019. No 5. P. 3–20. (in Russian). <https://doi.org/10.1134/S000218811905003X>
- Sychev V.G., Naliukhin A.N. Study of flows of carbon and nitrogen in long-term field experiments of the geoset with the purpose of reducing greenhouse gas emissions and increasing the deposition of carbon dioxide by agrocenoses. Plodorodie. 2021. No. 6(123). P. 38–41. (in Russian). <https://doi.org/10.25680/S19948603.2021.123.10>
- Theories and Methods of Soil Physics / Shein E.V., Karpachevsky L.O., Arkhangelskaya T.A., Bannikov M.V. et al.; Holes. eds. by E.V. Shein and L.O. Karpachevsky. Moscow: Grif i K, 2007. 616 p. (in Russian).
- Shmeleva N.V. Role of unconventional fodder crops to restore and increase the fertility of soddy-podzolic soil of upper Volga. Vladimirskij zemledec. 2021. No. 2(96). P. 47–52. (in Russian). <https://doi.org/10.24412/2225-2584-2021-2-47-52>
- Esedullaev S.T. Formation of herbage on the basis of changeable alfalfa on sod-podzolic soils of the upper Volga Region. Legumes and groat crops. 2017. No. 2(22). P. 121–126. (in Russian).
- Yagodin B.A. Agrokhimiya Moscow: Agropromizdat, 1989. 639 p. (in Russian).
- Paul E.A., Kravchenko A., Grandy A.S., Morris S. Soil organic matter dynamics: Controls and management for sustainable ecosystem functioning / S.K. Hamilton, J.E. Doll, G.P. Robertson (Eds). The Ecology of Agricultural Landscapes: Long-Term Research on the Path to Sustainability. New York: Oxford University Press, 2015. P. 104–134.

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.

Received 27 June 2025

Accepted 08 September 2025

Published 19 September 2025

About the authors:

Georgy V. Matyshak – Candidate of Biological Sciences, Expert, National Research University Higher School of Economics, Center for Technology Transfer (Moscow, Russia); matyshak@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0008-6428-9639>

Maria V. Arkhipova – Candidate of Geographical Sciences, Expert, National Research University Higher School of Economics, Center for Technology Transfer (Moscow, Russia); masha-a@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6196-8398>

Nikolay D. Durmanov – Deputy Director of the Center for Technological Transfer of the National Research University Higher School of Economics (Moscow, Russia), durmanov@postman.ru; <https://orcid.org/0009-0008-6622-7271>

Olga Ju. Goncharova – Candidate of Biological Sciences, Expert, National Research University Higher School of Economics, Center for Technology Transfer (Moscow, Russia); goncharovaoy@my.msu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1099-251X>

Marina I. Kondrashkina – Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Expert, National Research University Higher School of Economics, Center for Technology Transfer (Moscow, Russia); kondra_mar@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7180-5119>

Sergey N. Kordenkov – Deputy Director of the Center for Technological Transfer of the National Research University Higher School of Economics (Moscow, Russia); Skordenkov@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0004-3490-5286>

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 631.433.3:631.417.1

<https://doi.org/10.31251/pos.v8i3.334>**Методика количественного определения дыхания почвы в полевых условиях**© 2025 И. Н. Шарков 

ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, проспект Академика Лаврентьева, 8/2,
г. Новосибирск, 630090, Россия. E-mail: humus3@yandex.ru

Цель исследования. Разработка усовершенствованной методики определения фактической среднесуточной скорости эмиссии CO_2 из почвы в полевых условиях.

Место и время проведения. Апробация методики проведена в 2024 г. на темно-серой лесной почве ((Luvic Greyzemis Phaeozem (Siltic)) в правобережной части пригорода Новосибирска (район Академгородка) с координатами 54°51'03" с.ш., 83°11'00" в.д.

Метод. Методика представляет собой одну из модификаций абсорбционного метода определения дыхания почвы. Он основан на поглощении раствором щелочи диоксида углерода, диффузно выделяющегося из почвы. В полевых условиях чашечку с раствором щелочи помещают на поверхность почвы в сосуд-изолятор и закрывают его крышкой. После экспозиции, которая в зависимости от интенсивности дыхания и цели исследования может составлять несколько часов, сутки или быть кратной суткам, остаток щелочи оттитровывают кислотой и рассчитывают количество выделившегося из почвы CO_2 с учетом холостого определения.

Основные результаты. Усовершенствование методики связано с изменением конструкции сосуда-изолятора, параметров поглотителя и процедуры определения, что сделало ее более доступной и удобной для массового использования, а также позволило значительно повысить производительность работы. В качестве сосуда-изолятора используется тонкостенная ПВХ труба белого цвета с внутренним диаметром 10 см (площадь сечения 78,5 см²) и высотой 15 см, которая врезается в почву на 5–8 см и на период экспозиции закрывается крышкой. Поглотителем является 10 мл 1 н. раствора NaOH в пластиковой чашечке диаметром 6,2 см, что обеспечивает сорбционную поверхность раствора 30 см² – 38% накрываемой сосудом-изолятором поверхности почвы. Поглотитель рассчитан на улавливание в сосуде-изоляторе при суточной экспозиции 20–220 мг CO_2 , что позволяет измерять интенсивность дыхания почвы в диапазоне ~100–1200 мг $\text{CO}_2/\text{м}^2\cdot\text{ч}$. За счет увеличения экспозиции до 96 ч нижний предел можно понизить до 25 мг $\text{CO}_2/\text{м}^2\cdot\text{ч}$, а верхний – значительно увеличить благодаря двухступенчатому измерению, т.е. замене в сосуде-изоляторе раствора щелочи на новый раствор спустя 6–12 ч после начала экспозиции. В результате апробации методики были получены достоверные различия в месячной эмиссии C- CO_2 из почвы как в связи с состоянием растительности (залежь – чистый пар), так и по месяцам вегетационного периода – май – октябрь. Коэффициент вариации месячных значений эмиссии в большинстве случаев не превышал 10%, что объясняется небольшой площадью (около 25 м²) экспериментальных делянок и 4-кратной повторностью определения. За период май – октябрь темно-серая лесная почва под многолетней залежью потеряла 5,87 т/га C- CO_2 , а под чистым паром – 4,04. Использование методики в зимний период ограничивается замерзанием раствора щелочи при –3°С.

Заключение. Представлена методика количественного определения среднесуточной интенсивности дыхания почвы, разработанная на основании метода абсорбции. Обоснованы параметры сосуда-изолятора и поглотителя, а также процедура измерения, при которых возможно определение интенсивности дыхания почвы в широком диапазоне – от 25 до 1200 мг $\text{CO}_2/\text{м}^2\cdot\text{ч}$ и более. Представлены аргументы в пользу соответствия измеряемых с помощью методики данных фактической эмиссии CO_2 из почвы. Привлекательность методики для исследователей определяется высокой точностью (предел чувствительности $\pm 2\text{--}3$ мг CO_2) и производительностью определений (один сотрудник ежедневно может выполнять до 50 измерений), возможностью проведения определений в одно и то же время для большого числа вариантов опыта, отсутствием необходимости в титровании растворов щелочи сразу после экспозиции (это можно делать один раз в одну-две недели), возможностью перевозки до лаборатории герметично закрытых чашечек со щелочью автотранспортом, минимальным временем нахождения сотрудника в полевых условиях (только для расстановки и сбора чашечек), дешевой организацией оборудования и его доступностью, что важно для быстрой организации измерений; а также простотой и удобством работы (в частности, растворы щелочи титруются непосредственно в чашечках).

Ключевые слова: эмиссия CO_2 из почвы; камерный метод; абсорбционный метод; составляющие дыхания почвы; баланс углерода в почве.

Цитирование: Шарков И.Н. Методика количественного определения дыхания почвы в полевых условиях // Почвы и окружающая среда. 2025. Том 8. № 3. e334. DOI: [10.31251/pos.v8i3.334](https://doi.org/10.31251/pos.v8i3.334)

ВВЕДЕНИЕ

Процесс образования CO_2 в почве обуславливается в основном активностью ее обитателей – микроорганизмов и микрофауны, разлагающих **почвенное органическое вещество (ПОВ)**, и жизнедеятельностью корней растений. Интенсивность продуцирования CO_2 (дыхания почвы) включает, таким образом, гетеротрофную и автотрофную составляющие; в совокупности они характеризуют общую биологическую активность почвы. Для ее оценки, в связи с действием различных факторов, были разработаны первые методики определения дыхания почвы (Штатнов, 1952; Мина и др., 1963; Lundegardh, 1927).

Под количественной оценкой дыхания почвы в полевых условиях понимается определение фактической скорости эмиссии CO_2 из почвы в данное время. Безусловная необходимость в такой оценке возникает, если этот показатель используют в уравнениях расчета баланса углерода в почве. При этом требуется, как правило, знание потерь CO_2 из ПОВ за определенный период – месяц, сезон или год. Чтобы их рассчитать необходима методика, позволяющая, во-первых, количественно определять среднесуточную скорость эмиссии CO_2 из почвы и, во-вторых, вычленив в общем дыхании гетеротрофную составляющую. Некоторые методические подходы к решению этой задачи были описаны нами ранее (Шарков и др., 2024).

Хотя методы определения дыхания почвы разрабатываются многие десятилетия, до настоящего времени нет общепризнанной стандартной методики количественного определения потерь CO_2 из почвы в полевых условиях (Федоров и др., 2021; Шарков и др., 2024). Это затрудняет сравнение данных, полученных разными исследователями, и значительно ограничивает возможности для оперативного решения вопросов, связанных с оценкой баланса углерода в почвах в связи с действием природных и антропогенных факторов. Такая оценка важна для разработки и совершенствования мероприятий по управлению плодородием почвы в агроценозах, а также поиска решений актуальной климатической проблемы – повышения способности природных и антропогенно преобразованных экосистем по связыванию атмосферного CO_2 с целью ослабления парникового эффекта.

В настоящее время наибольшее развитие получили методики определения дыхания почвы, относящиеся к двум методам – камерному и абсорбционному. Сегодняшний камерный метод ранее назывался более предметно – методом обогащения (Mina и др., 1963; Singh, Gupta, 1977). Суть его заключается в том, что камерой, обычно в форме цилиндра, накрывают поверхность почвы и на период экспозиции (обычно 1–5 мин) камеру закрывают крышкой. Диффундирующий из почвы диоксид углерода накапливается в надпочвенной части камеры и по изменению его концентрации рассчитывают скорость эмиссии газа. Благодаря появлению высокоточных портативных ИК-газоанализаторов, с помощью которых обогащение воздуха камеры диоксидом углерода измеряют непосредственно в поле, камерный метод стал особенно популярным среди исследователей (Муравьева, Кулакова, 2022; Курганова и др., 2023; Fiedler et al., 2022). Однако сложность в том, что такие газоанализаторы достаточно дорогие и в настоящее время выпускаются только зарубежными фирмами. Кроме этого, из-за внутрисуточной динамики дыхания почвы, чтобы при минутных экспозициях достаточно точно определить среднесуточную скорость эмиссии CO_2 , измерения необходимо проводить несколько раз в сутки. Это значительно усложняет методику. Поэтому было предложено измерять дыхание почвы один раз в сутки, но в период, когда оно примерно соответствует среднесуточной скорости выделения CO_2 из почвы. Таким периодом одни исследователи (Ларионова, Розанова, 1993) считают с 9 до 10 ч утра, другие (Головацкая, Дюкарев, 2011) – с 10 до 13 ч, а ряд авторов (Алферов и др., 2017) полагает, что среднесуточную скорость эмиссии CO_2 можно определить, проводя измерения с 11 до 19 ч. Ясно, что увеличение этого периода делает работу более удобной. Однако следует иметь в виду сделанный по этому поводу вывод (Головацкая, Дюкарев, 2011): расчет годовой эмиссии CO_2 только на основе дневных измерений может завязать потери углерода на 20–50%. На наш взгляд, вопрос о соответствии скорости выделения CO_2 из почвы, измеренной в течение 1–5 минут камерным методом, фактической среднесуточной интенсивности дыхания почвы требует специального углубленного исследования. Поскольку внутрисуточная динамика почвенного дыхания обуславливается, в основном, изменением температуры, этот вопрос должен решаться, прежде всего, с учетом варьирования данного фактора в день измерения. Например, полагают (Головацкая, Дюкарев, 2011), что осенью, вследствие малой изменчивости температуры почвы, измерения эмиссии CO_2 камерным методом могут выполняться в любое дневное время. Итак, несмотря на высокую точность (1–2%) измерения концентрации CO_2 в камере с помощью современных ИК-газоанализаторов, использование данного метода может приводить к значительным ошибкам определения среднесуточной интенсивности дыхания почвы и, как следствие, расчета суммарных потерь CO_2 за период исследования.

Абсорбционный метод прост и не предполагает использования дорогостоящего оборудования, поэтому перспективен для широкого использования в почвенно-агрохимических и экологических исследованиях. Он основан на поглощении раствором щелочи диффузно выделяющегося из почвы диоксида углерода. В полевых условиях чашечку с раствором щелочи помещают на поверхность почвы в сосуд-изолятор и закрывают его крышкой. После экспозиции, которая в зависимости от интенсивности дыхания почвы и цели исследования может составлять несколько часов, сутки или быть кратной суткам, остаток щелочи оттитровывают кислотой и рассчитывают количество выделившегося из почвы CO_2 с учетом холостого определения.

Основная проблема абсорбционного метода – снижение поглотительной способности раствора щелочи во времени, что может приводить к неполному улавливанию выделяющегося из почвы CO_2 . На этом основании в литературе иногда делается вывод о получении абсорбционным методом заниженных данных (Головацкая, 2013; Алферов и др., 2017). Однако, по нашему мнению, претензии в данном случае следует предъявлять не к методу в целом, а к тем методикам, на основании которых этот вывод сделан. Так, авторы (Алферов и др., 2017), акцентируя внимание на данной проблеме абсорбционного метода, ссылаются на методику Л.О. Карпачевского (1977), которая якобы должна обеспечить получение более корректных результатов полевых измерений. Отметим, эта методика не предполагает использования сосуда-изолятора, что противоречит базовому принципу абсорбционного метода – обеспечению в экспозицию равновесия скоростей выделения CO_2 из почвы и поглощения его щелочью. Это равновесие обеспечивается за счет соответствующего изменения концентрации CO_2 в надпочвенной части сосуда-изолятора. К тому же в данной методике (Карпачевский, 1977) неправильно рассчитывается количество поглощенного раствором щелочи CO_2 – результат занижается в 2 раза, что было показано нами ранее (Шарков, 1987а). Е.А. Головацкая (2013), отмечая занижение в 2,5 раза получаемых абсорбционным методом данных, использовала методику В.И. Штатнова (1952), которая появилась за 2–3 десятилетия до того, как были проведены специальные исследования абсорбционного метода и изучены сорбционные свойства раствора щелочи (Шарков, 1983, 1984, 1987а, 1987б; Иванникова, 1992; Kirita, 1971; Coleman, 1973; Minderman, Vulto, 1973; Gupta, Singh, 1977). Поэтому изначально методика В.И. Штатнова (1952) была рассчитана на получение только сравнительных данных по биологической активности почвы, но не на количественное определение скорости эмиссии CO_2 , тем более, ее среднесуточных значений.

Перечисленные исследования инициировали разработку рекомендаций по выбору параметров раствора щелочи (концентрация, объем, площадь поверхности) и сосуда-изолятора (диаметр, высота, глубина врезания в почву), при которых должно обеспечиваться полное улавливание выделяющегося из почвы CO_2 . На основании этих работ нами была разработана методика, которая позволяет при суточной экспозиции определять скорость выделения CO_2 из почвы вплоть до $1000 \text{ мг } \text{CO}_2/\text{м}^2\cdot\text{ч}$ (Шарков, 1987б). В последние годы она была значительно усовершенствована, что сделало ее более доступной и удобной для массового использования. Усовершенствование связано с изменением конструкции сосуда-изолятора, параметров поглотителя и процедуры определения, что позволило значительно повысить производительность работы.

Целью наших исследований была разработка усовершенствованной методики количественного определения среднесуточной скорости выделения CO_2 из почвы в полевых условиях. Реализация данной цели будет способствовать проведению сравнительных определений дыхания почвы разными методами, что, надо полагать, ускорит разработку единой методики определения эмиссии CO_2 почвами в различных экосистемах.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Как уже отмечалось, методика абсорбционного определения дыхания почвы весьма простая и не требует использования сколько-нибудь дорогостоящего оборудования. Более того, сегодня все составные части прибора – сосуд-изолятор, крышка к нему, герметично закрывающиеся пластиковые чашечки для раствора щелочи, а также контейнеры для их хранения и перевозки могут быть свободно приобретены в торговой сети либо на маркетплейсах (рис. 1).

Оборудование. Сосуд-изолятор (сосуд) представляет собой цилиндр высотой 15 см с внутренним диаметром 10 см, изготовленный из тонкостенных (1,5 мм) труб ПВХ белого цвета. Изготовление сводится к разрезанию на токарном станке труб на части длиной 15 см. Важно, чтобы срез был гладким для обеспечения герметичности при закрывании сосуда крышкой.



Рисунок 1. Основные составляющие комплекта для измерения дыхания почвы в полевых условиях: 1 – сосуд-изолятор, 2 – крышка к сосуду, 3 – чашечка для раствора щелочи, 4 – крышка к чашечке, 5 – пипетка на 10 мл, 6 – мини-контейнер для хранения и перевозки чашечек. Фото автора.

Нами используются трубы для воздуховодов (ПВХ 10ВП, ТУ 4863-002-96059883-11), производимые фирмой «Эра», г. Рязань. Они прочные и не утрачивают своих свойств, по крайней мере, после 3 лет использования в полевых условиях. Крышки к сосудам-изоляторам белого цвета (артикул STR 100) приобретаются в фирме «МИНИВОРКС» (г. Санкт-Петербург). Они изготовлены из качественного эластичного пластика и также не утрачивают своих свойств при длительном использовании в поле.

Чашечки из пластика высотой 35 мм и диаметром основания 6,2 см имеют слегка коническую форму и при заливке 10 мл 1 н. раствора NaOH обеспечивают площадь поглотителя 30 см^2 , что составляет 38% от накрываемой сосудом-изолятором площади поверхности почвы. Они изготовлены из пластика толщиной 0,5 мм и имеют плоское дно, что удобно при титровании. Чашечки реализуются в торговой сети как «соусник 80 мл с неразъемной крышкой». Перед использованием крышка от чашечки аккуратно отрезается.

Герметически закрывающийся пластиковый мини-контейнер используют для хранения чашечек. Удобно иметь контейнеры разной вместимости – на 15–25 чашечек в зависимости от количества вариантов и повторностей в опытах. Мини-контейнеры помещают в пластмассовый ящик, который также закрывается крышкой. Такая система изоляции растворов щелочи в чашечках от воздуха исключает необходимость немедленного титрования растворов, что удобно при выполнении исследований в экспедициях или удаленных от лабораторий местах. Чашечки с раствором можно накапливать, перевозить в автомобиле, а титрование осуществлять один раз в одну-две недели.

Кроме перечисленного, для работы необходима автоматическая пипетка на 10 мл, обычная бюретка объемом 25 или 50 мл с автоматическим нулем (или современная цифровая бюретка) и магнитная мешалка.

Методика. Эмиссию CO_2 из почвы можно измерять на участке (рис. 2) с произрастающими растениями (общее дыхание) или на парующейся делянке (гетеротрофное дыхание); разница будет примерно соответствовать дыханию корней и ризосферных микроорганизмов, если оба фона расположены рядом и специально подготовлены. Перед определением из сосуда-изолятора всегда удаляют надземную часть растений, чтобы исключить влияние ее дыхания на результаты. Измерения выполняют обычно один раз в неделю и затем рассчитывают суммарные потери CO_2 из почвы за период исследования.



Рисунок 2. Определение дыхания почвы на залежном и парующемся участках. Фото автора.

Сосуд-изолятор врезают в почву на глубину, при которой обеспечивается его неподвижность при закрывании и снятии крышки. Было установлено (Шарков, 19876), что врезание нижнего края сосуда в почву на 5 и 10 см практически не сказывается на результатах определения дыхания почвы; в случае плотной почвы или на целинном (залежном) участке заглубление сосуда может составлять 5 см, на рыхлой пашне – 7–8 см. Для облегчения врезания можно воспользоваться ножом, которым по окружности сосуда в почве делаются проколы; затем легкими постукиваниями через дощечку по его верхнему краю достигается требуемое заглубление. Установленные сосуды-изоляторы обычно оставляют на одних и тех же местах в течение всего периода исследования.

С помощью автоматической пипетки в чашечку заливают 10 мл 1 н. раствора NaOH, устанавливают ее строго горизонтально на поверхность почвы в сосуде и закрывают его крышкой. Новые, не приработавшиеся крышки можно слегка увлажнить водой. Для холостого определения точно такое же количество раствора щелочи заливают в 3 чашечки (повторности), которые закрывают крышками и сразу же помещают в мини-контейнер. Опыт работы показал, что оставлять их в специальном сосуде в поле, как это практиковалось ранее (Шарков, 1984), нет необходимости. При сорбционной поверхности 30 см^2 раствор щелочи с такими параметрами обеспечивает практически полное улавливание за 24-часовую экспозицию до 220 мг CO_2 . Это позволяет при диаметре сосуда-изолятора 10 см измерять при суточной экспозиции интенсивность дыхания почвы до $1200 \text{ мг CO}_2/\text{м}^2\cdot\text{ч}$.

Изредка дыхание почвы может превышать данную величину, что становится понятным при первом же измерении. В таком случае дыхание определяют при двух последовательных экспозициях (двухступенчатое определение); например, 0–6 ч и 6–24 ч, т. е. спустя 6 ч чашечку в сосуде заменяют на новую. Первая экспозиция может быть и больше – 6–12 ч, если это удобно для принятого режима работы. Напротив, при низкой интенсивности дыхания ($< 100 \text{ мг CO}_2/\text{м}^2\cdot\text{ч}$), что может иметь место при пониженных температурах почвы ранней весной или поздней осенью, экспозицию следуеткратно увеличить – до 48–96 ч, чтобы раствор щелочи поглотил не менее 20 мг CO_2 . Это обуславливается повышением точности измерения с учетом предельной чувствительности метода, о чем будет сказано

ниже. Таким образом, возможный диапазон измерения эмиссии диоксида углерода за суточную экспозицию составляет 20–220 мг CO₂/сосуд (~100–1200 мг CO₂/м²·ч). Однако за счет увеличения экспозиции до 96 ч нижний предел можно понизить до 25 мг CO₂/м²·ч, а верхний – значительно повысить благодаря двухступенчатому определению.

В лаборатории раствор щелочи оттитровывают по фенолфталеину непосредственно в чашечке титрованным раствором 0,2 н. HCl. Хотя и редко, но на внутренней стороне крышки чашечки могут быть капли раствора, что является следствием неаккуратной транспортировки. Перед титрованием такие капли смывают в чашечку тонкой струей дистиллированной воды в количестве не более 20 мл. Если капли отсутствуют, воду в чашечку лучше не добавлять, поскольку на титрование будет израсходовано не менее 25 мл 0,2 н. раствора кислоты. В процессе титрования раствор в чашечке должен достаточно интенсивно перемешиваться с помощью магнитной мешалки. В холостом определении исчезновение малиновой окраски раствора четко фиксируется от одной капли 0,2 н. HCl. В рабочих определениях переход окраски менее четкий, но при достаточных навыках работы окончание титрования можно четко фиксировать от 1–3 капель титранта. Возможно также потенциометрическое титрование раствора до pH 8,3 с помощью автоматических титраторов. Однако при ручном титровании может быть выигрыш во времени за счет ускорения титрования повторностей (знание объема титранта в первой повторности позволяет другие растворы титровать быстрее). Практика работы показала, что на титрование по фенолфталеину 2-х холостых и 20-ти рабочих растворов (эксперимент из 5-ти вариантов в 4-кратной повторности) опытный оператор затрачивает около 1 часа. Поэтому один сотрудник вполне может ежедневно выполнять измерения с помощью 50-ти сосудов-изоляторов: расставлять и собирать чашечки, титровать растворы в лаборатории.

При обоих вариантах титрования количество выделившегося из почвы за экспозицию CO₂ (К, мг) рассчитывают по одной и той же формуле:

$$K = (a - b) \cdot n \cdot 44, \quad (1)$$

где а, б – количество титрованного (~0,2 н.) раствора HCl, пошедшее на титрование в холостом и рабочем определениях, соответственно, мл; n – точная нормальность раствора HCl; 44 – количество CO₂, эквивалентное 1 мл 1 н. HCl, мг. Для приготовления растворов NaOH и HCl используют реактивы класса не ниже «ч.д.а.».

Скорость выделения CO₂ из почвы за сутки (В, кг/га за 24 ч) рассчитывают по формуле:

$$B = \frac{K \cdot 24 \cdot 10^8}{\Xi \cdot 78,5 \cdot 10^6}, \quad (2)$$

где 24 – пересчет за сутки, ч; 10⁸ – пересчет см² в га; Ξ – экспозиция (при низкой скорости выделения CO₂ из почвы может быть кратной суткам), ч; 78,5 – накрываемая сосудом-изолятором площадь почвы, см²; 10⁶ – пересчет мг CO₂ в кг CO₂.

Суммарные потери CO₂ из почвы за период исследования (А, кг/га) рассчитывают по формуле:

$$A = \frac{(B_1 + B_2) \cdot t_1}{2} + \frac{(B_2 + B_3) \cdot t_2}{2} + \dots + \frac{(B_{n-1} + B_n) \cdot t_{n-1}}{2}, \quad (3)$$

где B₁, B₂, ..., B_n – величины первого, второго, n-ного измерений суточной скорости выделения CO₂ из почвы, соответственно, кг/га; t₁, t₂, t_{n-1} – периоды времени между измерениями, сутки. Чтобы результат выразить в С-CO₂, величину А умножают на коэффициент 0,273.

Апробация методики. Дыхание почвы определяли в 2024 г. на расположенных рядом площадках – многолетней разнотравно-злаковой залежи и чистом пару (см. рис. 2). Площадка чистого пара размером 5×5 (м) была создана путем срезания триммером надземной части растений 1 раз в неделю, начиная с середины мая 2023 г. Появляющиеся на площадке в 2024 г. проростки удаляли механически также один раз в неделю. Место проведения измерений – правобережная часть пригорода Новосибирска (район Академгородка) с координатами 54°51'03" с.ш., 83°11'00" в.д. Почва – темно-серая лесная (*Luvic Greyzemic Phaeozem (Siltic)*) среднесуглинистого гранулометрического состава. Дыхание почвы определяли с мая по октябрь один раз в неделю в 4-кратной повторности. Суммарные потери С-CO₂ из почвы по месяцам рассчитывали по формуле 3 (но в т/га) для каждой повторности определения и затем находили статистические характеристики массива данных с помощью пакета компьютерных программ (Сорокин, 2008).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Каков же предел чувствительности данной методики? Он определяется, в основном, точностью заливки в чашечку 10 мл раствора щелочи и отмеривания объема титранта при холостом и рабочем определениях. Современные автоматические пипетки обеспечивают точность дозирования раствора на уровне 0,5–0,7% (Механические дозаторы ..., 2025), а определение точки эквивалентности при титровании щелочи по фенолфталеину достигается, как уже отмечалось, от 1–3 капель раствора кислоты. Суммарно это может обеспечить ошибку определения $\pm 0,2$ – $0,3$ мл 0,2 н. НСІ, что, согласно уравнению (1), будет соответствовать ± 2 – 3 мг CO_2 . По нашему мнению, эти значения характеризуют предел чувствительности методики, т. е., если за экспозицию выделится такое количество CO_2 , оно не сможет быть зарегистрировано. Поэтому, как уже отмечалось, в случае очень низкой интенсивности дыхания почвы экспозицию следует увеличить, чтобы выделение диоксида углерода за этот период составило не менее 20 мг (более простой ориентир – разница между холостым и рабочим титрованиями должна быть не менее 2 мл 0,2 н. НСІ). Если эта разница увеличивается до 25 мл (т.е. за экспозицию поглощается максимально возможное количество CO_2 – 220 мг) – это сигнал для возможного перехода к двухступенчатому измерению среднесуточной скорости дыхания почвы, о чем говорилось выше.

Как часто придется прибегать к такой, не вполне удобной процедуре определения? Выше отмечалось, что поглощение за суточную экспозицию 220 мг CO_2 в сосуде-изоляторе с площадью сечения 78,5 см² соответствует измерению интенсивности дыхания почвы примерно 1200 мг $\text{CO}_2/\text{м}^2\cdot\text{ч}$. Мировая сводка по дыханию почв в различных экосистемах (Singh, Gupta, 1977), насчитывающая 61 определение, показала, что данная величина была превышена только в 9 случаях (15%), причем подавляющее большинство из них относилось к лесным экосистемам. Многочисленные современные определения дыхания почвы в лесных, болотных и травяных экосистемах северо-запада РФ показали (Алферов и др., 2017), что верхний диапазон значений составлял, в основном, 5–6 г $\text{C}/\text{м}^2\cdot\text{сутки}$ или 760–920 мг $\text{CO}_2/\text{м}^2\cdot\text{час}$, т. е. вполне мог быть измерен при суточной экспозиции с помощью данной методики. Таким образом, в подавляющем большинстве случаев дыхание почвы может определяться при обычной (не двухступенчатой) процедуре измерения.

Результаты апробации методики зафиксировали достоверные различия в месячной эмиссии C-CO_2 из почвы как в связи с состоянием растительности (залежь – чистый пар), так и по месяцам вегетационного периода (таблица). Коэффициент вариации значений в большинстве случаев был минимальным и не превышал 10%. По-видимому, основная причина слабо выраженной в данном случае вариабельности дыхания почвы – малый размер площадок (около 25 м²) и 4-кратная повторность определения.

Таблица

Месячные потери C-CO_2 из почвы залежи (1) и парующегося участка (2) и их статистические характеристики

Показатель	Май		Июнь		Июль		Август		Сентябрь		Октябрь		Май – октябрь	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
X	1,04	0,77	1,56	1,09	1,31	0,92	1,10	0,75	0,52	0,33	0,34	0,19	5,87	4,04
S	0,09	0,07	0,15	0,09	0,08	0,12	0,07	0,10	0,03	0,01	0,03	0,02	0,39	0,31
V	9	9	10	8	6	13	7	14	5	3	9	11	7	8
НСР ₀₅	0,14		0,22		0,20		0,15		0,03		0,04		0,60	

Примечание.

X – месячные потери C-CO_2 , т/га; S – стандартное отклонение, т/га; V – коэффициент вариации, %.

Поскольку определения на парующейся делянке проводили не в первый, а во второй год после удаления надземной фитомассы, разницу в дыхании почвы между залежью и паром не следует в полной мере относить на счет дыхания корней и ризосферных микроорганизмов. Дело в том, что ко второму году парования часть корней, вероятно, уже отмерла и могла активно разлагаться, т.е. гетеротрофная составляющая дыхания на парующейся площадке, скорее всего, была больше, чем на залежном участке. Если этим пренебречь, можно ориентировочно рассчитать долю автотрофной составляющей в общем дыхании почвы на залежном участке (%): в мае она составила – 26, июне – 30, июле – 30, августе – 32, сентябре – 37, октябре – 46, в целом за период исследования – 31.

С большей определенностью можно сказать о гетеротрофной составляющей дыхания почвы, которая на парующемся участке за период май – октябрь составила примерно 4 т $\text{C-CO}_2/\text{га}$ (см.

таблицу). Это означает, что для поддержания бездефицитного баланса углерода в такую почву ежегодно должно поступать примерно 10 т/га растительного вещества (при содержании в нем 40% С). При вовлечении такой почвы в зерновой агроценоз и получении традиционных для Сибири урожаев зерна (около 2 т/га) фактическое поступление углерода в почву с остатками будет примерно в 2 раза меньше (Шатохина, 1986). Это приведет к известным событиям (Биологическая продуктивность ..., 2018): залежная почва начнет длительное время (десяtkи лет) функционировать в переходном режиме, теряя органическое вещество до тех пор, пока не будет достигнуто новое стационарное состояние.

На каком основании делается вывод, что получаемые с помощью описанной методики данные соответствуют фактической эмиссии CO₂ из почвы? Во-первых, на основе исследования способности раствора щелочи сорбировать CO₂ (Шарков, 1983; 1987б) определено, что 10 мл 1 н. NaOH при сорбционной поверхности 30 см² обеспечивает полное улавливание за суточную экспозицию до 220 мг CO₂. Как уже говорилось, это достаточно для измерения дыхания почвы в подавляющем большинстве случаев. Во-вторых, ранее было показано (Шарков, 1984), что в процессе измерения под влиянием сосуда-изолятора (он изготавливался из дюралюминия) существенно не изменяются факторы, влияющие на биологическую активность почвы, – температура и влажность. Определение динамики температуры почвы под сосудом, используемым в настоящей методике (ПВХ белого цвета), подтвердило этот вывод. Среднесуточная температура парующейся почвы на глубине 6 см, измеренная с интервалом 3 ч, без сосуда-изолятора и под сосудом (был заглублен на 7 см) составила 24,2 и 23,8°C, соответственно. Как показал обзор литературы (Шарков и др., 2024), повышение температуры почвы на 1°C в диапазоне 5–30°C интенсифицирует продуцирование ею CO₂ примерно на 7%. Следовательно, изменение температуры почвы под влиянием сосуда-изолятора на 0,4°C не может существенно изменить ее биологическую активность и, следовательно, продуцирование CO₂. В-третьих, установлено (Шарков, 1987б), что для расчета суммарных потерь CO₂ из почвы за вегетационный период среднесуточную скорость эмиссии CO₂ достаточно определять 1 раз в неделю.

Отметим, что возможности измерения с помощью описанной методики дыхания почвы при пониженных, в том числе отрицательных, температурах воздуха ограничены. Раствор 1 н. NaOH замерзает при температуре примерно –3°C (Методические указания ..., 2025), поэтому ниже этой температуры методику использовать нельзя. Скорость поглощения CO₂ раствором щелочи при свободной диффузии из воздуха зависит от температуры. Наши измерения на высоте 0,8 м от поверхности почвы, проведенные в разное время года, показали, что с понижением температуры воздуха среднесуточная скорость поглощения CO₂ 1 н. раствором NaOH снижается, но значительно в меньшей степени, чем падает биологическая активность почвы. Так, если при среднесуточной температуре воздуха 25°C поглощение CO₂ раствором за 24 ч принять за 100%, то при 15, 13, 7 и –1°C оно составит 93, 89, 89 и 81%, соответственно. Отсюда можно заключить, что сосуд-изолятор и поглотитель с рекомендуемыми параметрами вполне могут использоваться для измерения дыхания почвы и при пониженных (до –3°C) температурах воздуха.

Таким образом, разработанный нами вариант методики может широко использоваться для количественного определения эмиссии диоксида углерода из почв природных и антропогенно преобразованных экосистем. Важно сравнивать получаемые данные с другими методами определения дыхания почвы, объективно показывать достоинства и недостатки методик, чтобы успешно двигаться в направлении их дальнейшего совершенствования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлена методика количественного определения среднесуточной интенсивности дыхания почвы, разработанная на основании метода абсорбции. Обоснованы параметры сосуда-изолятора и поглотителя, а также процедура измерения, при которых возможно определение интенсивности дыхания почвы в широком диапазоне – от 25 до 1200 мг CO₂/м²·ч и более. Представлены аргументы в пользу соответствия измеряемых с помощью методики данных фактической эмиссии CO₂ из почвы. Привлекательность методики для исследователей может определяться: 1) высокой точностью (предел чувствительности ±2–3 мг CO₂ при поглощении щелочью до 220 мг CO₂) и производительностью определений (один сотрудник ежедневно может выполнять до 50 измерений); 2) возможностью проведения определений в одно и то же время для большого числа вариантов опыта; 3) отсутствием необходимости в титровании растворов щелочи сразу после экспозиции (это можно делать один раз в одну-две недели); 4) возможностью перевозки на большие расстояния автотранспортом герметично закрытых чашечек со щелочью; 5) минимальным временем нахождения сотрудников в полевых условиях (только для расстановки и сбора чашечек); 6) дешевизной оборудования и его доступностью (что важно для быстрой организации измерений); 7) простотой и удобством работы (в частности,

растворы щелочи титруются непосредственно в чашечках, что значительно повышает производительность).

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Публикация подготовлена в рамках государственного задания Института почвоведения и агрохимии СО РАН при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ проекта 121031700309-1).

ЛИТЕРАТУРА

Алферов А.М., Блинов В.Г., Гитарский М.Л., Грабар В.А., Замолдчиков Д.Г., Зинченко А.В., Иванова Н.П., Ивахов В.М., Карабань Р.Т., Карелин Д.В., Калужный И.Л., Кашин Ф.В., Конюшков Д.Е., Коротков В.Н., Кровотынцев В.А., Лавров С.А., Марунич А.С., Парамонова Н.Н., Романовская А.А., Юзбеков А.К., Трунов А.А., Шилкин А.В. Мониторинг потоков парниковых газов в природных экосистемах. Саратов: Амирит, 2017. 279 с.

Головацкая Е.А. Потоки углерода в болотных экосистемах южной тайги Западной Сибири. Автореферат диссертации... д-р биол. наук. Красноярск, 2013. 33 с.

Головацкая Е.А., Дюкарев Е.А. Сезонная и суточная динамика эмиссии CO₂ с поверхности олиготрофной торфяной почвы // Метеорология и гидрология. 2011. № 6. С. 84–93.

Иванникова Л.А. Применение абсорбционного метода для определения естественного потока CO₂ из почвы // Почвоведение. 1992. № 6. С. 133–139.

Карпачевский Л.О. Пестрота почвенного покрова в лесном биогеоценозе. Москва: Изд-во МГУ, 1977. 312 с.

Курганова И.Н., Ильясов Д.В., Замолдчиков Д.Г., Карелин Д.В., Лопес де Гереню В.О., Матышак Г.В., Мигловец М.Н., Мошкина Е.В., Осипов А.Ф., Хорошаев Д.А., Шарков И.Н. Методическое руководство по определению эмиссии CO₂ из почв в различных типах экосистем. 2-е издание. Пушкино, 2023. 73 с.

Ларионова А.А., Розанова Л.Н. Суточная, сезонная и годовая динамика выделения CO₂ из почвы // Дыхание почвы. Пушкино: Пушкинский научный центр, 1993. С. 59–68.

Методические указания по эксплуатации баков серной кислоты и едкого натра на ТЭС [Электронный ресурс]. URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4294817/4294817934.pdf> (дата обращения 05.09.2025).

Механические дозаторы Sartorius Proline [Электронный ресурс]. URL: <https://pharm-servis.ru/products/laboratory-equipment/pipettes/mechanical-dispensers/proline> (дата обращения 05.09.2025).

Мина В.Н., Макаров Б.Н., Мацкевич В.Б., Штатнов В.И. Методы изучения воздушного режима почв при стационарных исследованиях // Почвоведение. 1963. № 6. С. 48–57.

Муравьева Е.А., Кулакова Е.С. Обзор приборной базы по контролю парниковых газов // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. 2022. Том 14. № 1. С. 62–69. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-1-62-69>

Сорокин О.Д. Прикладная статистика на компьютере. Новосибирск: СО РАСХН, 2008. 217 с.

Биологическая продуктивность травяных экосистем. Географические закономерности и экологические особенности / А.А. Титлянова, Н.И. Базилевич, В.А. Снытко [и др.]. 2-е издание, исправленное и дополненное. Новосибирск: Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, 2018. 110 с. <https://doi.org/10.31251/978-5-600-02350-5>

Федоров Ю.А., Сухоруков В.В., Трубник Р.Г. Аналитический обзор: эмиссия и поглощение парниковых газов почвами. Экологические проблемы // Антропогенная трансформация природной среды. 2021. Том 7. № 1. С. 6–34. <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2021-1-6-34>

Шарков И.Н. Исследование параметров раствора щелочи как абсорбента CO₂ при определении дыхания почвы // Почвоведение. 1983. № 1. С. 132–138.

Шарков И.Н. Определение интенсивности продуцирования CO₂ почвой абсорбционным методом // Почвоведение. 1984. № 7. С. 136–143.

Шарков И.Н. Сравнительная характеристика двух модификаций абсорбционного метода определения дыхания почв // Почвоведение. 1987а. № 10. С. 153–157.

Шарков И.Н. Совершенствование абсорбционного метода определения выделения CO₂ из почвы в полевых условиях // Почвоведение. 1987б. № 1. С. 127–133.

Шарков И.Н., Чумбаев А.С., Андроханов В.А. Оценка баланса углерода в почвах на основе определения эмиссии CO₂ // Агрохимия. 2024. № 9. С. 78–89. <https://doi.org/10.31857/S0002188124090095>

- Шатохина Н.Г. Продукционный процесс в зерновых агроценозах на выщелоченных черноземах Приобья // Плодородие почв и питание растений. Новосибирск: Сибирское отделение ВАСХНИЛ, 1986. С. 25–53.
- Штатнов В.И. К методике определения биологической активности почвы // Доклады ВАСХНИЛ. 1952. Вып. 6. С. 27–30.
- Coleman D.C. Soil carbon balance in a successional grassland // Oikos. 1973. Vol. 24. No. 2. P. 195–199. <https://doi.org/10.2307/3543875>
- Fiedler J., Fuß R., Glatzel S., Hagemann U., Huth V., Jordan S., Jurasinski G., Kutzbach L., Maier M., Schäfer K., Weber T., Weymann D. Best Practice Guideline: Measurement of carbon dioxide, methane and nitrous oxide fluxes between soil-vegetation-systems and the atmosphere using nonsteady state chambers. 2022. <https://doi.org/10.23689/ridgeo-5422>
- Gupta S.R., Singh J.S. Effect of alkali concentration, volume and absorption area on the measurement of soil respiration in a tropical sward // Pedobiologia. 1977. Vol. 17. Iss. 4. P. 233–239. [https://doi.org/10.1016/S0031-4056\(23\)00176-2](https://doi.org/10.1016/S0031-4056(23)00176-2)
- Kirita H. Re-examination of the absorption method of measuring soil respiration under field conditions. II. Effect of the size of the apparatus on CO₂-absorption rates // Japanese Journal of Ecology. 1971. Vol. 21. No. 1–2. P. 119–127.
- Lundegardh H. Carbon dioxide evolution of soil and crop growth // Soil Science. 1927. Vol. 23. No. 6. P. 417–453. https://journals.lww.com/soilsci/citation/1927/06000/carbon_dioxide_evolution_of_soil_and_crop_growth.1.aspx
- Minderman G., Vulto I.C. Comparison of techniques for the measurement of carbon dioxide evolution from soil // Pedobiologia. 1973. Vol. 13. No. 2. P. 73–80.
- Singh J.S., Gupta S.R. Plant decomposition and soil respiration in terrestrial ecosystems // The botanical review. 1977. Vol. 43. No. 4. P. 449–528. <https://doi.org/10.1007/BF02860844>

Поступила в редакцию 09.09.2025

Принята 13.10.2025

Опубликована 17.10.2025

Сведения об авторе:

Шарков Иван Николаевич – доктор биологических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории агрохимии ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск, Россия); humus3@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3961-2672>

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.



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

Methodology of quantitative determination of soil respiration in field conditions

© 2025 I. N. Sharkov 

Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Lavrentieva, 8/2, Novosibirsk, Russia. E-mail: humus3@yandex.ru

The aim of the study was to improve methodology for determining the actual average daily rate of CO₂ emission from soil in field conditions.

Location and time of the study. The method was tested in 2024 on dark gray forest soil ((Luvic Greyzem Phaeozem (Siltic)) in the right-bank part of the Novosibirsk suburbs (Akademgorodok area) with coordinates 54°51'03" N, 83°11'00" E.

Method. The methodology is one of the modifications of the absorption method for measuring soil respiration. It is based on the absorption of carbon dioxide, diffusely released from soil, by an alkali solution. In the field, a cup with an alkali solution is placed on the soil surface in an insulating vessel and closed with a lid. After exposure, which, depending on the intensity of respiration and the purpose of the study, can be several hours, a day, or many days, the alkali residue is titrated with acid and the amount of CO₂, released from soil, is calculated.

Results. The methodology was improved by a change in the design of the isolator vessel, the parameters of the absorber and the measurement procedure, which made it more feasible and convenient for mass use, allowing also to significantly increase the efficacy of the work. A thin-walled PVC pipe with an internal diameter of 10 cm (cross-sectional area of 78,5 cm²) and a height of 15 cm is used as an isolator vessel, which is inserted into soil for 5–8 cm, and then closed with a lid for the exposure period. The absorber is 10 ml of 1N NaOH in a plastic cup with a diameter of 6,2 cm, which provides 30 cm² of solution sorption surface, equal to 38% of the soil surface covered by the isolator vessel. The absorber is designed to capture 20–220 mg CO₂ in the isolator vessel with a daily exposure, which allows measuring the intensity of soil respiration in the range of ~ 100–1200 mg CO₂/m²·h. By increasing the exposure to 96 h, the lower limit can be reduced to 25 mg CO₂/m²·h, and the upper one increased

significantly by the two-stage measurement, i.e. replacing the alkali solution in the isolator vessel with a new solution 6–12 hours after the exposure start. As a result of testing the technique, reliable differences were obtained in the monthly emission of C-CO₂ from the soil both related to the vegetation type (abandoned land vs. fallow) and to the vegetation period, i.e. May – October. The variation coefficient of monthly emission most often did not exceed 10%, which is explained by the small area (about 25 m²) of the experimental plots and 4-fold measurement replication. During the period May – October, the dark gray forest soil under the perennial fallow lost 5.87 and under bare fallow 4.04 t/ha of C-CO₂. The use of the technique in winter is limited by the freezing of the alkali solution at -3°C.

Conclusions. The article presents a methodology for quantitative determination of average daily soil respiration intensity developed on the basis of the absorption method. The parameters of the insulator and absorber vessel, as well as the measurement procedure, are substantiated, which makes it possible to measure soil respiration intensity in a wide range from 25 to 1200 mg CO₂/m²·h and more. Arguments are presented in favor of the correspondence between the data measured using the methodology and the actual CO₂ emissions from the soil. The attractiveness of the method for researchers is determined by high accuracy (sensitivity limit ±2–3 mg CO₂), labour efficiency (one employee can perform up to 50 measurements daily), the ability to carry out determinations at the same time for a large number of experimental treatments, no need to titrate alkali solutions immediately after exposure (this can be done once every one or two weeks), the ability to transport hermetically sealed cups with alkali, shorter time needed for field work (only for placing and collecting cups), lower cost of the equipment and its higher availability (important for rapid organization of measurements), as well as simplicity and ease of use (in particular, alkali solutions are titrated directly in the cups).

Keywords: CO₂ emission from soil; chamber method; absorption method; components of soil respiration; carbon balance in soil.

How to cite: Sharkov I.N. Methodology of quantitative determination of soil respiration in field conditions. *The Journal of Soils and Environment*. 2025. 8(3). e334. DOI: [10.31251/pos.v8i3.334](https://doi.org/10.31251/pos.v8i3.334) (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. 121031700309-1).

REFERENCES

- Alferov A.M., Blinov V.G., Gitarsky M.L., Grabar V.A., Zamolodchikov D.G., Zinchenko A.V., Ivanova N.P., Ivakhov V.M., Karaban R.T., Karelin D.V., Kalyuzhny I.L., Kashin F.V., Konyushkov D.E., Korotkov V.N., Krovotyntsev V.A., Lavrov S.A., Marunich A.S., Paramonova N.N., Romanovskaya A.A., Yuzbekov A.K., Trunov A.A., Shilkin A.V. Monitoring greenhouse gas fluxes in natural ecosystems. Saratov: Amirit, 2017. 279 p. (in Russian).
- Golovatskaya E.A. Carbon fluxes in wetland ecosystems of the southern taiga of Western Siberia. Abstract of Dissertation ... Dr. of Biol. Sci. Krasnoyarsk, 2013. 33 p. (in Russian).
- Golovatskaya E. A., Dyukarev E. A. Seasonal and diurnal dynamics of CO₂ emission from oligotrophic peat soil surface. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2011. Vol. 36. No. 6. P. 413–419. <https://doi.org/10.3103/S1068373911060094>
- Ivannikova L.A. Application of absorption method for measuring of CO₂ natural flow from soil. *Pochvovedenie*. 1992. No. 6. P. 133–139. (in Russian).
- Karpachevsky L.O. Variegation of soil cover in forest biogeocenosis. Moscow: Moscow State University Press, 1977. 312 p. (in Russian).
- Kurganova I.N., Ilyasov D.V., Zamolodchikov D.G., Karelin D.V., Lopez de Guerenyu V.O., Matyshak G.V., Miglovets M.N., Moshkina E.V., Osipov A.F., Khoroshaev D.A., Sharkov I.N. Methodological guidelines for determining CO₂ emissions from soils in various types of ecosystems. 2nd edition. Pushchino, 2023. 73 p. (in Russian).
- Larionova A.A., Rozanova L.N. Daily, seasonal and annual dynamics of CO₂ emission from soil. In book: *Soil respiration*. Pushchino: Pushchino scientific center, 1993. P. 59–68. (in Russian).
- Guidelines for the operation of sulfuric acid and caustic soda tanks at thermal power plants [Electronic resource]. URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4294817/4294817934.pdf> (accessed on 05.09.2025). (in Russian).
- Mechanical dispensers Sartorius Proline [Electronic resource]. URL: <https://pharm-servis.ru/products/laboratory-equipment/pipettes/mechanical-dispensers/proline> (accessed on 05.09.2025). (in Russian).
- Mina V.N., Makarov B.N., Matskevich V.B., Shtatnov V.I. Methods for studying the air regime of soils during stationary studies. *Pochvovedenie*. 1963. No. 6. P. 48–57. (in Russian).
- Muravieva E.A., Kulakova E.S. Overview of the instrumental base for the control of greenhouse gases. *Nanotechnologies in construction: a scientific internet-journal*. 2022. Vol. 14. No. 1. P. 62–69. (in Russian). <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-1-62-69>

- Sorokin O.D. Applied statistics on the computer. Novosibirsk: SB RAAS, 2008. 217 p. (in Russian).
- Biological productivity of grasslands. Geographical regularities and ecological features / A.A. Titlyanova, N.I. Bazilevich, V.A. Snytko et al. 2nd edition, corrected and amended. Novosibirsk: ISSA SB RAS, 2018. 110 p. (in Russian). <https://doi.org/10.31251/978-5-600-02350-5>
- Fedorov Yu.A., Sukhorukov V.V., Trubnik R.G. Review: Emission and absorption of greenhouse gases by soils. Ecological problems. Anthropogenic Transformation of Nature. 2021. Vol. 7. No. 1. P. 6–34. (in Russian). <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2021-1-6-34>
- Sharkov I.N. Study of parameters of alkali solution as CO₂ absorbent in determining soil respiration. Pochvovedenie. 1983. No. 1. P. 132–138. (in Russian).
- Sharkov I.N. Determination of the rate of soil CO₂ production by the absorption method. Soviet Soil Science. 1984. Vol. 16. No. 3. P. 102–111.
- Sharkov I.N. Comparison of two modifications of absorption methods of determination of soil respiration. Pochvovedenie. 1987a. No. 10. 153–157. (in Russian).
- Sharkov I.N. An Improved absorption method for measuring production of soil CO₂ under field conditions. Soviet Soil Science. 1987b. No. 1. P. 102–109.
- Sharkov I.N., Chumbaev A.S., Androkhanov V.A. Estimation of soil carbon balance based on CO₂ emission determination. Agrokhimia. 2024. No. 9. C. 78–89. (in Russian). <https://doi.org/10.31857/S0002188124090095>
- Shatokhina N.G. Production process in grain agrocenoses on leached chernozems of the Ob region. In book: Soil fertility and plant nutrition. Novosibirsk: Siberian branch of VASKhNIL, 1986. P. 25–53. (in Russian).
- Shtatnov V.I. On the methodology for determining the biological activity of soil. Reports of VASKhNIL. 1952. Iss. 6. P. 27–30. (in Russian).
- Coleman D.C. Soil carbon balance in a successional grassland. Oikos. 1973. Vol. 24. No. 2. P. 195–199. <https://doi.org/10.2307/3543875>
- Fiedler J., Fuß R., Glatzel S., Hagemann U., Huth V., Jordan S., Jurasinski G., Kutzbach L., Maier M., Schäfer K., Weber T., Weymann D. Best Practice Guideline: Measurement of carbon dioxide, methane and nitrous oxide fluxes between soil-vegetation-systems and the atmosphere using nonsteady state chambers. 2022. <https://doi.org/10.23689/figeo-5422>
- Gupta S.R., Singh J.S. Effect of alkali concentration, volume and absorption area on the measurement of soil respiration in a tropical sward. Pedobiologia. 1977. Vol. 17. Iss. 4. P. 233–239. [https://doi.org/10.1016/S0031-4056\(23\)00176-2](https://doi.org/10.1016/S0031-4056(23)00176-2)
- Kirita H. Re-examination of the absorption method of measuring soil respiration under field conditions. II. Effect of the size of the apparatus on CO₂-absorption rates. Japanese Journal of Ecology. 1971. Vol. 21. No. 1–2. P. 119–127.
- Lundegardh H. Carbon dioxide evolution of soil and crop growth. Soil Science. 1927. Vol. 23. No. 6. P. 417–453. https://journals.lww.com/soilsci/citation/1927/06000/carbon_dioxide_evolution_of_soil_and_crop_growth.1.aspx
- Minderman G., Vulto I.C. Comparison of techniques for the measurement of carbon dioxide evolution from soil. Pedobiologia. 1973. Vol. 13. No. 2. P. 73–80.
- Singh J.S., Gupta S.R. Plant decomposition and soil respiration in terrestrial ecosystems. The botanical review. 1977. Vol. 43. No. 4. P. 449–528. <https://doi.org/10.1007/BF02860844>

Received 09 September 2025

Accepted 13 October 2025

Published 17 October 2025

About the author:

Ivan N. Sharkov – Doctor of Biological Sciences, Associate Professor, 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); humus3@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3961-2672>

The author read and approved the final manuscript



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

Цифровое картографирование содержания органического углерода в почвах Кузнецко-Салаирской геоморфологической провинции с использованием онлайн-платформы Google Earth Engine

© 2025 Н. В. Гопп 

ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, проспект Академика Лаврентьева, 8/2,
г. Новосибирск, 630090, Россия. E-mail: natalia.gopp@gmail.com

Цель исследования. Провести цифровое картографирование содержания почвенного органического углерода (ПОУ) в 0–30 см слое почв с использованием 11 наборов предикторов и алгоритма Random Forest (RF), реализованного на онлайн-платформе Google Earth Engine.

Место и время проведения. Исследование проведено в Кузнецко-Салаирской геоморфологической провинции (в пределах Искитимского района Новосибирской области).

Методы. Цифровое картографирование проведено с использованием алгоритма Random Forest (RF) с настройками 200 и 1000 «деревьев». Реализация алгоритма выполнена на онлайн-платформе Google Earth Engine в виде скрипта (кода). В процессе картографирования содержания ПОУ были использованы растровые карты предикторов, характеризующих следующие факторы почвообразования: климат, рельеф, растительность, пространственное положение, почвенные свойства. Моделирование проведено на основе различного количества предикторов в наборе в зависимости от коэффициента корреляции (R) между содержанием ПОУ и значениями предикторов: 1) 80 (все); 2) 50 (все с $R > \pm 0,1$); 3) 42 (все с $R > \pm 0,2$); 4) 26 (все с $R > \pm 0,3$); 5) 15 все с $R > \pm 0,4$). Дополнительно проведено картографирование содержания ПОУ с использованием пяти наборов предикторов, характеризующих отдельные факторы почвообразования (рельеф, климат, растительность, почва, пространственное положение), и одного набора, объединяющего по пять доминирующих предикторов от каждого фактора почвообразования. Таким образом, всего было использовано 11 наборов предикторов, представленных как в сочетании показателей от разных факторов почвообразования, так и по отдельным группам. Почвенная база данных создана на основе архивных материалов Института землеустройства «ЗапсибНИИгипрозем» за период с 1984 по 1994 годы и содержит данные по содержанию ПОУ в 0–30 см слое почв ($n=261$). В работе использован обучающий (ОНД, $n=206$) и валидационный (ВНД, $n=55$) наборы почвенных данных.

Основные результаты. Лучший результат картографирования содержания ПОУ в 0–30 см слое почв алгоритмом RF (200 «деревьев») получен на основе 42 предикторов. Показатели эффективности моделирования следующие: $R^2_{ОНД}=0,83$; $R^2_{ВНД}=0,55$; $RMSE_{ВНД}=1,25\%$. По фактическим данным, содержание ПОУ в 0–30 см слое исследуемых почв варьировало от 1,2% до 13,9%. Согласно составленной карте, наибольшее содержание ПОУ выявлено в почвах юго-западной части исследуемой территории.

Заключение. Использование растровых карт предикторов с низким исходным разрешением (1×1 км – WorldClim, 250×250 м – SoilGrids) и улучшенным до 30×30 м в сочетании с картами предикторов среднего разрешения (рельеф, растительность, пространственное положение) позволяет достичь лучших результатов в картографировании содержания ПОУ. Одни группы предикторов (климат, почва, пространственное положение) позволяют отобразить на итоговой карте глобальный тренд в изменении содержания ПОУ, а другие (рельеф, растительность) – дифференцирующие/детализирующие тренды, учитывающие особенности рельефа и растительности. Таким образом, предикторы, характеризующие разные факторы почвообразования, взаимно дополняют друг друга в их совмещённом наборе и позволяют получить более детальные/дифференцированные карты при проведении картографирования содержания ПОУ в почвах.

Ключевые слова: цифровое картографирование; содержание органического углерода; почвы; Западная Сибирь; WorldClim; FABDEM; SoilGrids; Landsat 5; SAGA GIS.

Цитирование: Гопп Н.В. Цифровое картографирование содержания органического углерода в почвах Кузнецко-Салаирской геоморфологической провинции с использованием онлайн-платформы Google Earth Engine // Почвы и окружающая среда. 2025. Том 8. № 3. e335. DOI: [10.31251/pos.v8i3.335](https://doi.org/10.31251/pos.v8i3.335)

ВВЕДЕНИЕ

Картографические материалы, полученные в результате изучения пространственной изменчивости содержания почвенного органического углерода (ПОУ) с использованием данных дистанционного зондирования Земли, могут быть полезны, в первую очередь, для землепользователей и ученых, изучающих изменения свойств почв и климата. Снижение содержания ПОУ является показателем интенсивности использования почвы и происходящих в ней процессов деградации, локализацию которых можно выявить с использованием картографического подхода, в дальнейшем

приняв меры по их устранению. Наряду с этим, при протекании различных процессов (минерализации, секвестрации и др.) почвы вносят значительный вклад в углеродный обмен между наземными экосистемами и атмосферой, являясь источниками выбросов и поглощения парниковых газов, которые оказывают как положительное, так и отрицательное воздействие на климат Земли (IPCC, 2006; FAO and ITPS, 2020; Шарков, Антипина, 2022; Романова и др., 2024). Нарастание проблемы выбросов парниковых газов привело к формированию рынка торговли квотами, который стимулирует их сокращение (Zhang, Wen, 2022). Изучение различных процессов, связанных с изменением содержания ПОУ, как в пространственном, так и временном аспектах, неинформативно без картографического подхода, который позволяет визуализировать пространственную изменчивость изучаемых свойств почв и произвести необходимые расчёты, поэтому исследования в данном направлении являются актуальными.

Анализ исследований показал, что алгоритм машинного обучения Random Forest (**RF**) чаще всего использовался для цифрового картографирования свойств почв (Гопп и др., 2023; Duarte et al., 2022; Suleymanov et al., 2023). Этот алгоритм реализован в программном обеспечении R (R Core Team, 2022) и на онлайн-платформе Google Earth Engine (Gorelick et al., 2017). Google Earth Engine (GEE) предоставляет готовые к использованию наборы геопространственных данных и несколько серверов для их обработки. Возможность распределять вычисления по серверам делает платформу GEE привлекательной для выполнения трудоемких задач (Gorelick et al., 2017; Gandhi, 2023). Алгоритм машинного обучения Random Forest обладает рядом преимуществ перед другими алгоритмами классификации и регрессии. К числу этих преимуществ относятся следующие: 1) значительное повышение точности за счет разработки ансамбля деревьев регрессии (Breiman, 2001); 2) новый подход к определению значимости переменных; 3) возможность моделировать сложные взаимодействия переменных; 4) возможность выполнять различные виды статистического анализа, включая регрессию и классификацию; 5) использование алгоритмов для вычисления недостающих данных (Cutler et al., 2007); 6) использование дополнительной информации с помощью различных типов энтропии (Ignatenko et al., 2024); 7) устойчивость к уменьшению объема обучающих данных и шумам (Rodrigues-Galiano et al., 2012); 8) отсутствие необходимости в предположении о нормальности распределения данных; 9) возможность получения приемлемого прогноза за пределами области полевых исследований. Потенциал методов машинного обучения для цифрового картографирования свойств почв трудно переоценить, поскольку эти методы позволяют обрабатывать большое количество данных (качественных/количественных/категориальных) и точечных лабораторно-полевых измерений почв без ограничений на их статистические параметры.

Предикторы играют важную роль в процессе создания цифровых карт пространственной изменчивости свойств почв при наличии ограниченного количества геопривязанных данных из пунктов пробоотбора почвенных образцов, необходимых для обучения моделей при использовании алгоритмов машинного обучения. Однако проблема выбора информативных предикторов до сих пор остается дискуссионной и в большей степени зависит от предпочтений экспертов или их профессиональных навыков работы с теми или иными геопространственными данными. Порой эксперты вынуждены отдавать предпочтение предикторам, характеризующим один или два фактора почвообразования, при этом отсутствие в модели других очень важных факторов может привести к значительному снижению показателей эффективности моделирования. Зачастую из-за отсутствия необходимых геопространственных данных, некоторые предикторы вообще не используются в моделировании. Например, при картографировании содержания ПОУ, такого важного предиктора в виде растровых карт как количество поступивших растительных остатков за весь период почвообразования не существует, а получить эти данные с использованием дистанционного зондирования Земли (**ДЗ**) невозможно. Безусловно, отсутствие растровых карт подобных важных показателей негативно сказывается на точности геопространственного моделирования содержания ПОУ. Поэтому, чаще всего, в геопространственном моделировании свойств почв используют показатели, определяемые по данным **ДЗ** или архивным источникам, которые оказывают косвенное/опосредованное влияние на процессы, приводящие к изменению содержания ПОУ.

Стратегия выбора информативных предикторов, в первую очередь, основана на знании как самих предикторов (статические, сезонные, среднегодовые и т.д.), так и характеристик геопространственных данных (разрешение, количество спектральных диапазонов, наличие облаков, атмосферной коррекции и т.д.). В частности, дискуссионным является вопрос об использовании отдельных мультиспектральных снимков или их композиций для сезона или года, сезонных композиций за разные годы. Например, в исследовании (Luo et al., 2022) продемонстрировано, что точность картографирования содержания органического вещества в почве на основе снимков Landsat-8 разных

временных периодов существенно различается; в частности, наилучшие результаты картографирования были получены на основе использования снимков, усредненных за разные годы и сделанных в периоды отсутствия растительности на почве. В других исследованиях (Zhou et al., 2023) показано, что совместное использование снимков Sentinel-1 и Sentinel-2 повысило точность картографирования содержания ПОУ.

Размер области исследования имеет важное значение при выборе предикторов, рассчитываемых по мультиспектральным снимкам. Если территория большая, то это может привести к получению пространственных данных, которые будут соответствовать разным фазам развития растительности. Это связано с трудностями получения снимков большой территории для одной и той же фазы роста растений, поскольку спутниковая съемка таких территорий не может быть произведена в одно и то же время. Чаще всего при региональном картографировании больших территорий составляют мозаику из разновременных снимков, поэтому такая процедура может привести к сложностям интерпретации полученных результатов моделирования.

Очень часто в геопространственном моделировании используют климатические прогнозы с низким пространственным разрешением, например, WorldClim (разрешение 1×1 км) (Fick, Hijmans, 2017). Эти прогнозы основаны на долгосрочных гидрометеорологических данных с удаленных друг от друга постов. Однако применение этих данных даже на небольших территориях с использованием процедур, улучшающих разрешение и качество растровых карт, показывает, что переменные климата часто оказываются в числе ведущих предикторов (Гопп, Нечаева, 2024; Moquedace et al., 2024). Безусловно, улучшение разрешения растровых карт не способствует повышению точности или детальности представления климатических данных. Однако положительным моментом является то, что, согласно концепции SCORPAN (Arrouays et al., 2020), такой важный фактор почвообразования как климат (C) учитывается в совокупном анализе данных; использование этих данных позволяет отразить на итоговых картах глобальные тренды в изменении свойств почв.

Цель исследования – провести цифровое картографирование содержания ПОУ в 0–30 см слое почв с использованием 11 наборов предикторов и алгоритма Random Forest, реализованного на онлайн-платформе Google Earth Engine.

Картографирование содержания ПОУ в почвах основывалось на концепции **SCORPAN** (Arrouays et al., 2020), которая подразумевает использование имеющихся пространственных данных о факторах почвообразования, характеризующих свойства почв (S), климат (C), организмы (O), рельеф (R), почвообразующие породы (P), возраст (A) и пространственное положение (N).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследуемый регион площадью 4384 км^2 расположен в западной части Кузнецко-Салаирской геоморфологической провинции Алтае-Саянской горной страны (Российская Федерация, Новосибирская область, Искитимский район) (рис. 1).

Климат региона резко континентальный; среднегодовые температуры колеблются от $-0,3^\circ\text{C}$ до $-0,6^\circ\text{C}$; средняя температура января составляет -19°C , а средняя температура июля – $+19^\circ\text{C}$. Годовое количество осадков варьирует от 400 до 450 мм. Территория исследования относится к лесостепной зоне и имеет денудационно-аккумулятивный рельеф.

Почвенная база данных (рис. 1), содержащая описание почвенных профилей ($n=261$), создана на основе архивных материалов Института землеустройства «ЗапсибНИИгипрозем» за период с 1984 по 1994 годы (Гопп, 2021). В базе данных содержится описание почв, в основном, пахотных угодий, доля почв других угодий (сенокосы и пастбища) составляет 1,5%. Таксономические названия почв представлены по классификации и диагностике почв СССР (Классификация ..., 1977) и мировой реферативной базе данных почвенных ресурсов WRB (IUSS Working Group ..., 2015). Черноземы, темно-серые лесные, серые и светло-серые лесные почвы сформировались на лёссовидных карбонатных суглинках; на оглеенных лёссовидных суглинках – лугово-черноземные и луговые почвы; на аллювиальных отложениях рек (супесях и песках) – аллювиальные луговые почвы. Гранулометрический состав почвообразующих пород и почв в основном представлен средними и тяжелыми суглинками (иловато-пылеватыми).

Содержание ПОУ определено методом Тюрина (Аринушкина, 1970). Согласно рекомендациям (FAO ..., 2021), полученные результаты по содержанию ПОУ были умножены на коэффициент 1,15, который позволяет учесть ошибки, связанные с неполным окислением органического углерода, определяемого методом Тюрина.

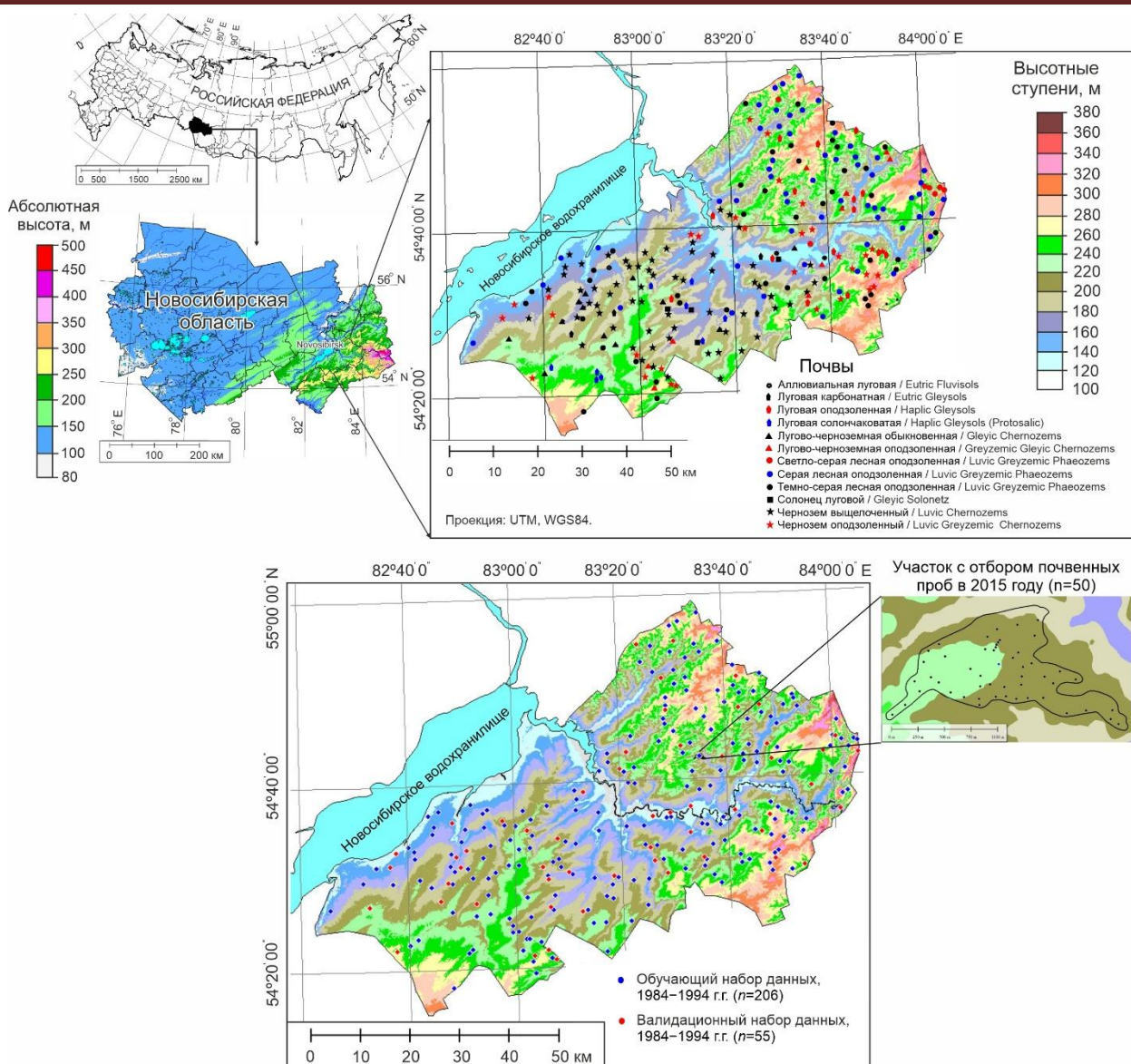


Рисунок 1. Карта высотных ступеней исследуемой территории и расположение почвенных разрезов (n=261). Названия почвенных таксономических единиц приведены по классификации и диагностике почв СССР (Классификация ..., 1977), через косую черту – по мировой реферативной базе данных почвенных ресурсов WRB (IUSS Working Group ..., 2015).

В процессе картографирования содержания ПОУ были использованы растровые карты предикторов, характеризующих следующие факторы почвообразования: климат, рельеф, растительность, пространственное положение, почвенные свойства (табл. 1).

Растровые карты предикторов, характеризующих рельеф, построены на основе цифровой модели высот FABDEM V1-2 (Forest and Buildings removed Copernicus DEM, разрешение 30×30 м), в которой произведена корректировка высоты на участках, занятых лесами и зданиями (Hawker et al., 2022). Данные FABDEM можно использовать для получения информации об общих топографических характеристиках местности, как на уровне хозяйства, так и на уровне отдельных полей (Erupova, Yakubailik, 2024).

Усредненные значения отражения по каждому каналу (Band 1, 2, 3, 4, 5, 7) получены на основе безоблачных снимков со спутника Landsat 5 TM (разрешение 30×30 м, Level-2 Data Products – Surface Reflectance) за следующие даты съемки в вегетационном периоде: 04.07.1989 г., 20.05.1990 г., 21.06.1990 г., 07.05.1994 г. На основе полученных усредненных данных по необходимым каналам вычислены различные вегетационные индексы (см. табл. 1) в программном обеспечении SAGA GIS (Conrad et al., 2015). В качестве категориального предиктора, характеризующего наземный покров, был использован продукт ESA CCI LC (European Space Agency Climate Change Initiative Land Cover) за 1992 год (Defourny et al., 2017; Defourny et al., 2023).

Таблица 1

Перечень предикторов, использованных в цифровом картографировании содержания ПОУ

Сокращенное название / интерпретация	Интерпретация на русском языке
Предикторы, характеризующие климат (на основе данных WorldClim и архивных карт). Исходное разрешение 1×1 км, в настоящей работе преобразовано к 30×30 м	
BIO1/Annual Mean Temperature	Среднегодовая температура
BIO2 / Mean Diurnal Range (Mean of monthly (max temp - min temp))	Среднесуточная разность (среднее значение за месяц (макс.температура - мин. температура))
BIO3 / Isothermality ((BIO2/BIO7) ×100)	Изотермичность (BIO2/BIO7) (×100)
BIO4 / Temperature Seasonality (stand. dev.×100)	Сезонность температуры (стандартное отклонение ×100)
BIO5 / Max Temperature of Warmest Month	Максимальная температура самого теплого месяца
BIO6 / Min Temperature of Coldest Month	Минимальная температура самого холодного месяца
BIO7 / Temperature Annual Range (BIO5-BIO6)	Годовой диапазон температур (BIO5-BIO6)
BIO8 / Mean Temperature of Wettest Quarter	Средняя температура самого влажного квартала
BIO9 / Mean Temperature of Driest Quarter	Средняя температура самого сухого квартала
BIO10 / Mean Temperature of Warmest Quarter	Средняя температура самого теплого квартала
BIO11 / Mean Temperature of Coldest Quarter	Средняя температура самого холодного квартала
BIO12 / Annual Precipitation	Годовое количество осадков
BIO13 / Precipitation of Wettest Month	Количество осадков в самый влажный месяц
BIO14 / Precipitation of Driest Month	Количество осадков в самый засушливый месяц
BIO15 / Precipitation Seasonality (Coefficient of Variation)	Сезонность осадков (коэффициент вариации)
BIO16 / Precipitation of Wettest Quarter	Количество осадков в самом влажном квартале
BIO17 / Precipitation of Driest Quarter	Количество осадков в самом сухом квартале
BIO18 / Precipitation of Warmest Quarter	Количество осадков в самом теплом квартале
BIO19 / Precipitation of Coldest Quarter	Количество осадков в самом холодном квартале
SRmean / Mean Solar Radiation per year (sum by month divided by 12)	Среднее солнечное излучение за год (сумма по месяцам, деленная на 12)
SAT10 / Sum of Active Temperatures above 10°C	Сумма активных температур выше 10°C
CC / Coefficient of Continentality of Climate	Коэффициент континентальности климата
EVAP / Evaporation	Испаряемость
CH / Coefficient of Humidity	Коэффициент увлажнения
AgPot / Agroecological potential	Агроэкологический потенциал
Предикторы, характеризующие рельеф (на основе FABDEM V1-2, разрешение 30×30 м)	
ELEV / Elevation	Высота над уровнем моря
Slope	Крутизна склонов
LS / LS-Factor	Коэффициент соотношения длины и крутизны склона
Aspect	Экспозиция склонов
CrosSecCurv / Cross-Sectional Curvature	Кривизна поперечного сечения
FlowLineCurv / Flow Line Curvature	Кривизна линии потока
GenCurv / General Curvature	Главная кривизна
LongCurv / Longitudinal Curvature	Продольная кривизна
MinCurv / Minimal Curvature	Минимальная кривизна
MaxCurv / Maximal Curvature	Максимальная кривизна
ProfCurv / Profile Curvature	Профильная кривизна
PlanCurv / Plan Curvature	Плановая кривизна
TanCurv / Tangential Curvature	Тангенциальная кривизна
TotCurv / Total Curvature	Общая кривизна
ConvIndex / Convergence Index	Индекс конвергенции
Texture / Terrain Surface Texture	Рельефная текстура поверхности
Convexity / Terrain Surface Convexity	Индекс выпуклости
MassBalans / Mass Balance Index	Индекс баланса массы
AnalitHill / Analytical Hillshading	Аналитическая затененность холмов
VallDepth / Valley Depth	Глубина долин
TWI / Topographic Wetness Index	Топографический индекс влажности
TCA / Total Catchment Area	Общая площадь водосбора
RSP / Relative Slope Position	Относительное положение на склоне
TPI / Topographic Position Index	Топографический индекс положения
TRI / Terrain Ruggedness Index	Индекс расчлененности рельефа

CND / Channel Network Distance	Расстояние до водотоков (дренажной сети)
CNBL / Channel Network Base Level	Базовый уровень водотоков
VisSky / Visible Sky	Видимость неба
SkyViewFact / Sky View Factor	Фактор видимости неба
Предикторы, характеризующие пространственное положение (разрешение 30×30 м)	
LONG / Longitude	Географическая долгота
LAT / Latitude	Географическая широта
Предикторы, характеризующие растительность (на основе Landsat 5 TM, разрешение 30×30 м)	
NDVI / Normalized Difference Vegetation Index	Нормализованный разностный вегетационный индекс
CTVI / Corrected Transformed Vegetation Index	Скорректированный трансформированный вегетационный индекс
DVI / Difference Vegetation Index	Разностный вегетационный индекс
NRVI / Normalized Ratio Vegetation Index	Нормализованный относительный вегетационный индекс
RVI / Ratio Vegetation Index	Относительный вегетационный индекс
SAVI / Soil Adjusted Vegetation Index	Вегетационный индекс с коррекцией по почве
TVI / Transformed Vegetation Index	Трансформированный вегетационный индекс
TTVI / Tiam's Transformed Vegetation Index	Трансформированный вегетационный индекс Тиамы
Band 1 / Visible Blue	Канал B1 – Видимый синий диапазон
Band 2 / Visible Green	Канал B2 – Видимый зеленый диапазон
Band 3 / Visible Red	Канал B3 – Видимый красный диапазон
Band 4 / Near-Infrared	Канал B4 – Ближний инфракрасный диапазон
Band 5 / Near-Infrared	Канал B5 – Ближний инфракрасный диапазон
Band 7 / Mid-Infrared	Канал B7 – Средний инфракрасный диапазон
Предикторы, характеризующие почву (SoilGrids, для свойств почв в слое 0-30 см) (Poggio et al., 2021). Исходное разрешение 250×250 м, в настоящей работе преобразовано к 30×30 м	
pH / Acidity	pH водной суспензии (кислотность)
NITRO / Total nitrogen	Содержание общего азота
SOSC / Soil Organic Carbon Stocks	Запасы органического углерода в почве
CEC / Cation Exchange Capacity	Емкость катионного обмена
CLAY / Clay content	Содержание ила (глины)
SILT / Silt content	Содержание пыли
SAND / Sand content	Содержание песка
BD / Soil Bulk Density	Плотность сложения почв
Soil Groups	Почвенные группы по WRB 2006

Для предикторов, характеризующих свойства почв по данным SoilGrids (табл. 1), было выполнено усреднение путём суммирования растров по глубинам (0–5, 5–15, 15–30 см) и деления на 3.

Растровые карты таких климатических показателей как SAT10, EVAP, CC, CH, AgPot (табл. 1) составлены с использованием архивных картографических данных (Сляднев, 1978; Гопп, 2023).

Большая часть растровых карт предикторов имеет разрешение 30×30 м, поэтому разрешение карт с отличным от этого значения приведено к 30×30 м. Преобразование разрешения растровых карт касалось климатических данных WorldClim с разрешением 1×1 км (Fick, Hijmans, 2017) и глобальных почвенных данных SoilGrids с разрешением 250×250 м (Poggio et al., 2021). Такая практика использования глобальных данных является допустимой в работах подобного плана, так как более детальных карт в лучшем разрешении не существует. Трудоемкость получения данных среднего и высокого разрешения с необходимым временным усреднением для большой территории приводит к необходимости использования растровых карт с низким пространственным разрешением, которое преобразовывают согласно техническому требованию проекта. В качестве примера совместного использования геоданных с низким и средним разрешением можно привести недавно опубликованную работу ученых из Западной Амазонии (Moquedace et al., 2024). В настоящей работе при изменении разрешения растровых карт климатических показателей WorldClim применена интерполяция B-Spline, которая позволяет сделать плавный переход между значениями пикселей. При изменении разрешения глобальных почвенных данных SoilGrids применена интерполяция методом ближайшего соседа (Nearest Neighbour), которая присваивает вновь созданным пикселям значение исходного пикселя.

Размеры пикселя определяют предел детальности снимка, а окончательный масштаб выбирается исходя из целей картографирования. Снимки с разрешением 30×30 м подходят для составления среднемасштабных и мелкомасштабных карт с масштабом от 1:50 000 и мельче. Однако, согласно руководству по почвенной съемке (Евдокимова, 1987), при работе с почвами, для которых обязательно

должны быть представлены полевые данные, масштаб карты зависит не только от разрешения снимков, но и от детальности полевой почвенной съемки, а именно от количества гектаров, приходящихся на один почвенный разрез. Аналогичный подход можно применить при составлении карт почвенных свойств. Таким образом, если площадь территории в гектарах разделить на количество разрезов, то мы получим количество гектаров, приходящихся на 1 разрез. В настоящем исследовании на 1 почвенный разрез приходится 1679 га, что, согласно руководству (Евдокимова, 1987), определяет предел детальности карт, соответствующий масштабу 1:200 000. Это означает, что публикация карт в аналоговой (бумажной) форме в данном масштабе является научно обоснованной, поскольку её содержание полностью обеспечено достаточным количеством полевых данных.

Для моделирования содержания ПОУ с использованием алгоритма RF созданы обучающий (ОНД, $n=206$) и валидационный (ВНД, $n=55$) наборы почвенных данных. ВНД использовался для оценки эффективности моделирования содержания ПОУ и сформирован с учётом минимальных, средних и максимальных значений ПОУ в каждом типе и подтипе почв. Гармонизация данных по содержанию ПОУ из разных интервалов глубин почвенного профиля до заданной мощности слоя (0–30 см) выполнена с использованием пакета *mpspline2* в программном обеспечении R (O'Brien, 2022).

Математические операции с геопривязанными растровыми картами выполнены на облачной онлайн-платформе Google Earth Engine (Gorelick et al., 2017) и в программном обеспечении SAGA GIS (Conrad et al., 2015). Карты содержания ПОУ созданы с использованием алгоритма Random Forest (RF), реализованного в виде скрипта (кода) на онлайн-платформе Google Earth Engine, со следующими настройками: 200 и 1000 «деревьев», остальные значения гиперпараметров по умолчанию. Термин «дерево» в концепции алгоритма RF означает независимый алгоритм, обучающийся на случайной подвыборке данных и подмножестве признаков. Алгоритм RF позволяет создавать множество «деревьев»; дальнейшее объединение результатов работы разных независимых «деревьев» или алгоритмов даёт более точные и устойчивые предсказания для зависимой/целевой переменной. Конечный результат – среднее значение предсказаний по всем созданным «деревьям» (Breiman, 2001).

Моделирование с использованием алгоритма RF проводилось на основе разного количества предикторов в наборе в зависимости от коэффициента корреляции (**R**) между содержанием ПОУ и значениями предикторов: 1) все 80; 2) 50 (все с $R \geq \pm 0,1$); 3) 42 (все с $R \geq \pm 0,2$); 4) 26 (все с $R \geq \pm 0,3$); 5) 15 (все с $R \geq \pm 0,4$). Также было проведено картографирование содержания ПОУ с использованием пяти наборов предикторов, характеризующих отдельные факторы почвообразования согласно модели SCORPAN (почва (S), климат (C), растительность (O), рельеф (R), пространственное положение (N)), и одного набора, объединяющего по 5 доминирующих показателей от каждого фактора почвообразования. Таким образом, всего было использовано 11 наборов предикторов, представленных как в сочетании показателей от разных факторов почвообразования, так и по отдельным группам.

Эффективность моделирования оценена с использованием коэффициента детерминации (R^2), который определен по графику зависимости между фактическими и предсказанными значениями для двух наборов данных: ОНД ($R^2_{\text{онд}}$) и ВНД ($R^2_{\text{внд}}$). В общем случае $R^2=1$ означает, что модель идеально эффективна для моделирования, а $R^2=0$ – модель объясняет вариацию изучаемого показателя не лучше, чем среднее значение. $R^2_{\text{онд}}$ показывает, насколько качественно модель аппроксимирует фактические данные, на которых она обучалась. $R^2_{\text{внд}}$ отражает предсказательную способность модели для новых данных, т.е. тех данных, которые не использовали в обучающем наборе данных. $R^2_{\text{внд}}$ рассчитан путем наложения ВНД на карту содержания ПОУ, построенную на основе ОНД, с последующим извлечением предсказанных значений в геопривязанных точках расположения профилей почв и построением графика зависимости между предсказанными и фактическими значениями. Кроме этого, эффективность моделирования оценена на основе ВНД с использованием следующих показателей: корень из среднеквадратической ошибки (**RMSE**, *англ.* Root Mean Square Error), средняя абсолютная процентная ошибка (**MAPE**, *англ.* Mean Absolute Percentage Error) и средняя абсолютная ошибка (**MAE**, *англ.* Mean Absolute Error).

Корень из среднеквадратической ошибки рассчитан следующим образом (Hengl, 2007):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=0}^n [\hat{z}(sj) - z(sj)]^2}$$

где n – количество наблюдений в анализируемом наборе данных, $z(sj)$ – прогнозируемое значение, $\hat{z}(sj)$ – наблюдаемое значение. Данные представлены в единицах измерения содержания ПОУ (%).

Значения RMSE, близкие к нулю, указывают на идеальное соответствие модели фактическим данным. Значение RMSE, составляющее менее половины стандартного отклонения измеренных данных, указывает на высокий уровень точности прогноза (Singh et al., 2004).

Средняя абсолютная процентная ошибка MAPE рассчитана следующим образом (Афанасьев, Цыпин, 2008):

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum \frac{|y_t - \bar{y}_t|}{y_t} \times 100,$$

где y_t – фактическое значение, $\bar{y}_t$ – прогнозируемое значение, n – количество наблюдений в анализируемом наборе данных.

Точность моделирования оценивалась по значениям MAPE следующим образом (Афанасьев, Цыпин, 2008): <10% – высокая; 10–20% – хорошая; 20–50% – удовлетворительная; >50% – неудовлетворительная точность.

Среднее отклонение прогнозируемых значений от фактического значения было рассчитано с использованием средней абсолютной ошибки MAE:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_t - \bar{y}_t|,$$

где y_t – фактическое значение; $\bar{y}_t$ – прогнозируемое значение; n – количество наблюдений в анализируемом наборе данных. $|y_t - \bar{y}_t|$ – абсолютное значение (без отрицательного знака).

Блок-схема методологии цифрового картирования содержания ПОУ представлена на рисунке 2.

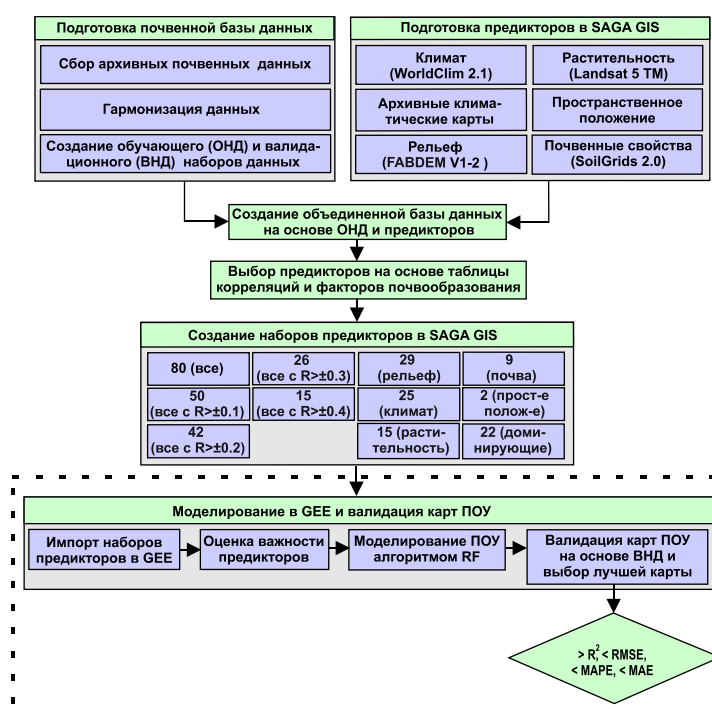


Рисунок 2. Блок-схема методики цифрового картографирования содержания ПОУ в почвах.

На рисунке 1 показано поле площадью 112 га, на котором в 2015 году отобраны почвенные образцы ($n=50$) из слоя 0–30 см. Полученные данные по содержанию ПОУ в этих образцах почв не использовались при обучении моделей и картографировании и были предназначены для визуального сравнения результатов моделирования (1984–1994 гг.) с современными (2015 г.) данными путём наложения последних на карту ПОУ. Такое наложение позволяет приблизительно оценить возможные изменения в содержании ПОУ с течением времени. Необходимо отметить, что данные 2015 года нельзя использовать для количественной оценки точности карты, построенной по данным 30-летней давности, так как за это время свойства почвы могли существенно измениться.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ

По фактическим данным содержание ПОУ варьировало в пределах 1,2–13,9% (табл. 2). Коэффициент вариации во всех наборах данных составил более 40%, что указывает на сильную

вариабельность. Значения коэффициента асимметрии (> 1) показывают, что общий и обучающий наборы данных имеют сильную правостороннюю асимметрию, а валидационный – слабую, что указывает на более однородные данные или отсутствие значительного количества экстремальных значений (выбросов) по сравнению с общим и обучающим наборами данных. Значения коэффициента эксцесса для общего и обучающего наборов данных указывают на существенное отклонение от нормального распределения; для валидационного набора данных распределение близко к нормальному. При моделировании алгоритмом RF допускается использование данных с аномальным распределением, поэтому логарифмирование данных обучающего набора не проводилось.

Таблица 2

Статистика по содержанию ПОУ для общего, обучающего и валидационного наборов данных

Показатель	Наборы данных		
	Общий ($n=261$)	Обучающий ($n=206$)	Валидационный ($n=55$)
Среднее, %	4,6	4,6	4,5
Стандартное отклонение, %	$\pm 2,0$	$\pm 2,1$	$\pm 1,8$
Минимум, %	1,2	1,3	1,2
Медиана, %	4,4	4,4	4,4
Максимум, %	13,9	13,9	10,0
Коэффициент вариации, %	43,9	44,8	40,0
Коэффициент асимметрии	1,32	1,45	0,45
Коэффициент эксцесса	3,49	3,84	0,17

Важность предикторов для цифрового картографирования содержания ПОУ оценили с использованием корреляционного анализа (табл. 3) и показателя относительной степени важности (индекс IncNodePurity/Джинни) предикторов (рис. 3).

Таблица 3

Коэффициенты корреляции Спирмена (R) между содержанием ПОУ и значениями предикторов, характеризующих факторы почвообразования

Предиктор	R	Предиктор	R	Предиктор	R
BIO1	0,38**	LS	–	LONG	-0,35**
BIO2	-0,22**	Aspect	–	LAT	-0,61**
BIO3	-0,32**	CrosSecCurv	–	NDVI	–
BIO4	0,50**	FlowLineCurv	–	CTVI	–
BIO5	0,41**	GenCurv	–	DVI	–
BIO6	0,23**	LongiCurv	-0,20**	NRVI	–
BIO7	0,24**	MinCurv	–	RVI	–
BIO8	0,42**	MaxCurv	–	SAVI	–
BIO9	-0,26**	ProfCurv	-0,19**	TVI	–
BIO10	0,42**	PlanCurv	–	TTVI	–
BIO11	–	TanCurv	–	Band 1	-0,24**
BIO12	-0,40**	TotCurv	–	Band 2	-0,31**
BIO13	-0,27**	ConvIndex	–	Band 3	-0,26**
BIO14	-0,42**	Texture	-0,28**	Band 4	-0,26**
BIO15	0,31**	Convexity	-0,22**	Band 5	-0,18**
BIO16	-0,41**	MassBalans	–	Band 7	–
BIO17	-0,33**	AnalitHill	–	pH	0,17*
BIO18	-0,41**	ValDepth	–	NITRO	0,47
BIO19	-0,24**	TWI	0,26**	SOCS	–
SRmean	0,51**	TCA	0,14*	CEC	0,34**
SAT10	0,23**	RSP	-0,14*	CLAY	-0,38**
CC	0,49**	TPI	-0,17	SILT	–
EVAP	0,41**	TRI	-0,19**	SAND	0,31**
CH	-0,42**	CND	-0,36**	BD	-0,34**
AgPot	-0,55**	CNBL	–	SoilGroups	–
ELEV	-0,21**	VisSky	–	LandCov	–
Slope	-0,20**	SkyViewFact	–		

Примечание: ** корреляция значима при $p < 0,01$; * $p < 0,05$; прочерк – корреляция отсутствует или не значима. Интерпретация сокращённого названия предикторов приведена в табл. 1.

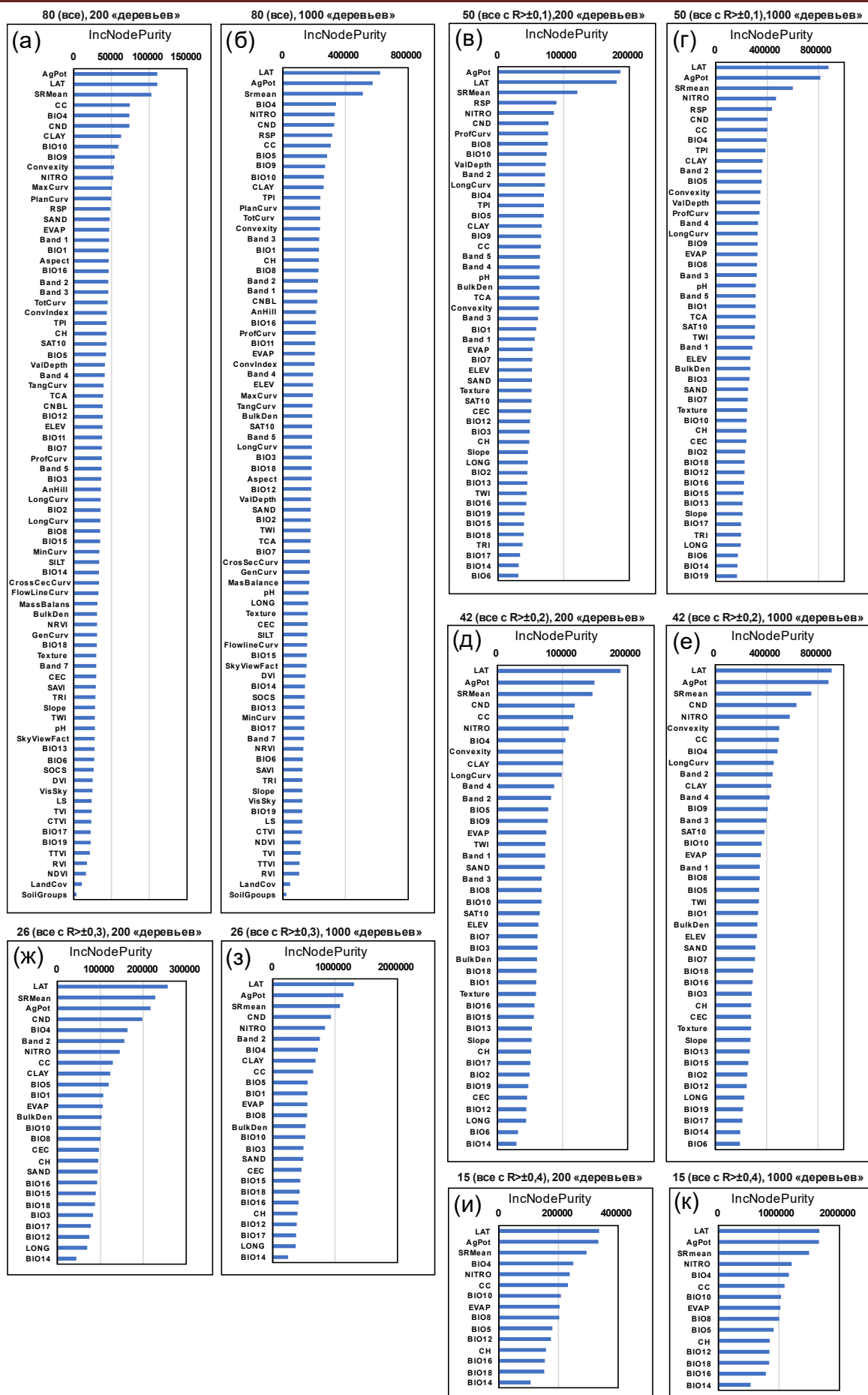


Рисунок 3. Относительная степень важности (индекс IncNodePurity) предикторов в моделях с разным количеством «деревьев» и предикторов в наборе. Обозначения предикторов см. в табл. 1.

Корреляционный анализ показал, что из 80 потенциальных переменных 25 были наиболее значимыми ($R > 0,3$) для картографирования содержания ПОУ (табл. 3). Умеренная положительная корреляция (R в диапазоне от 0,3 до 0,5) выявлена между содержанием ПОУ и следующими переменными: BIO1, BIO4, BIO5, BIO8, BIO10, SRmean, CC, EVAP, NITRO, CEC, SAND. Умеренная отрицательная корреляция (R в диапазоне от -0,3 до -0,5) установлена со следующими переменными: BIO3, BIO12, BIO14, BIO16, BIO17, BIO18, CH, AgPot, CND, LONG, LAT, Band 2, CLAY, BD (табл. 3). Обращает на себя внимание отсутствие корреляции между содержанием ПОУ и его запасами по данным SoilGrids (табл. 3). Анализ карты запасов ПОУ (SoilGrid) показал, что данные сильно усреднены, а карта имеет слабую дифференциацию по значениям запасов ПОУ; следовательно, эта особенность является причиной отсутствия корреляции между вышеупомянутыми показателями. При моделировании алгоритмом RF количество используемых предикторов не ограничено. Для сравнительного анализа были выбраны предикторы с разным их количеством в наборе (табл. 3): 1) 80 (все); 2) 50 (все с $R > \pm 0,1$); 3) 42 (все с $R > \pm 0,2$); 4) 26 (все с $R > \pm 0,3$); 5) 15 (все с $R > \pm 0,4$). Относительная степень важности отдельных переменных в моделях с вышеуказанными наборами предикторов показана на рисунке 3. Чем выше значение чистоты узла в «деревьях», определяемого по индексу IncNodePurity/Джинни, тем больше вклад переменной в объясняющую способность модели. Анализ графиков показывает, что ранжирование значимости предикторов определяется не по более высоким значениям коэффициентов корреляции между исследуемыми показателями (табл. 3, рис. 3). Например, предикторы PlanCurv и MaxCurv не коррелировали с содержанием ПОУ, однако на графике видно, что степень их важности выше, чем у CH, у которого коэффициент корреляции с ПОУ равен -0,42 (рис. 3 а, б). Также стоит отметить, что предикторы с R менее $\pm 0,3$ (Convexity, MaxCurv, RSP, Band 1 и др.) по степени важности были выше тех, у которых R был намного больше $\pm 0,3$ (рис. 3 а, б). Данная ситуация может указывать на наличие более значимых зависимостей между изучаемыми переменными в отдельных «деревьях» моделей; однако, эксперту невозможно определить силу их корреляционной зависимости, в связи с отсутствием понимания устройства модели, которую в машинном обучении называют «черный ящик», то есть она рассматривается как система, имеющая некий вход для ввода информации и выход для отображения результатов работы, при этом принципы взаимодействия её компонентов и происходящие в ходе работы системы процессы эксперту неизвестны. Увеличение количества «деревьев» до 1000 привело к незначительному изменению положения отдельных предикторов на графиках (рис. 3 б). Во всех рассматриваемых наборах предикторов доминировали предикторы, характеризующие климат и пространственное положение (AgPot, LAT, SRmean); затем располагались предикторы, характеризующие почвенные свойства, рельеф и растительность (рис. 3).

В порядке убывания $R^2_{\text{ОНД}}$, модели с разным количеством предикторов расположились следующим образом (количество в наборе): 80 – 50 – 42 – 26 – 15 (табл. 4).

Таблица 4

Эффективность моделирования содержания ПОУ алгоритмом RF с различным количеством «деревьев» и наборов предикторов

Наборы предикторов (см. табл. 1, 3)	Показатели эффективности моделирования				
	$R^2_{\text{ОНД}}$	$R^2_{\text{ВНД}}$	RMSE _{ВНД} , %	MAPE _{ВНД} , %	MAE _{ВНД} , %
200 «деревьев» в модели					
80 (все предикторы)	0,84	0,52	1,29	28,5	0,96
50 (все с $R > \pm 0,1$)	0,84	0,51	1,29	28,7	0,98
42 (все с $R > \pm 0,2$)	0,83	0,55	1,25	27,6	0,95
26 (все с $R > \pm 0,3$)	0,82	0,54	1,25	27,6	0,95
15 (все с $R > \pm 0,4$)	0,78	0,46	1,33	26,7	0,97
1000 «деревьев» в модели					
80 (все предикторы)	0,85	0,54	1,27	28,5	0,95
50 (все с $R > \pm 0,1$)	0,84	0,53	1,28	28,4	0,97
42 (все с $R > \pm 0,2$)	0,83	0,56	1,24	27,3	0,94
26 (все с $R > \pm 0,3$)	0,83	0,54	1,25	27,6	0,94
15 (все с $R > \pm 0,4$)	0,78	0,46	1,33	26,5	0,96

Примечание. $R^2_{\text{ОНД}}$ – коэффициент детерминации, рассчитанный по обучающему набору данных (ОНД); RMSE_{ВНД} – корень из среднеквадратической ошибки, рассчитанный по валидационному набору данных (ВНД); MAPE_{ВНД} – средняя абсолютная ошибка в процентах, рассчитанная по ВНД; MAE_{ВНД} – средняя абсолютная ошибка, рассчитанная по ВНД.

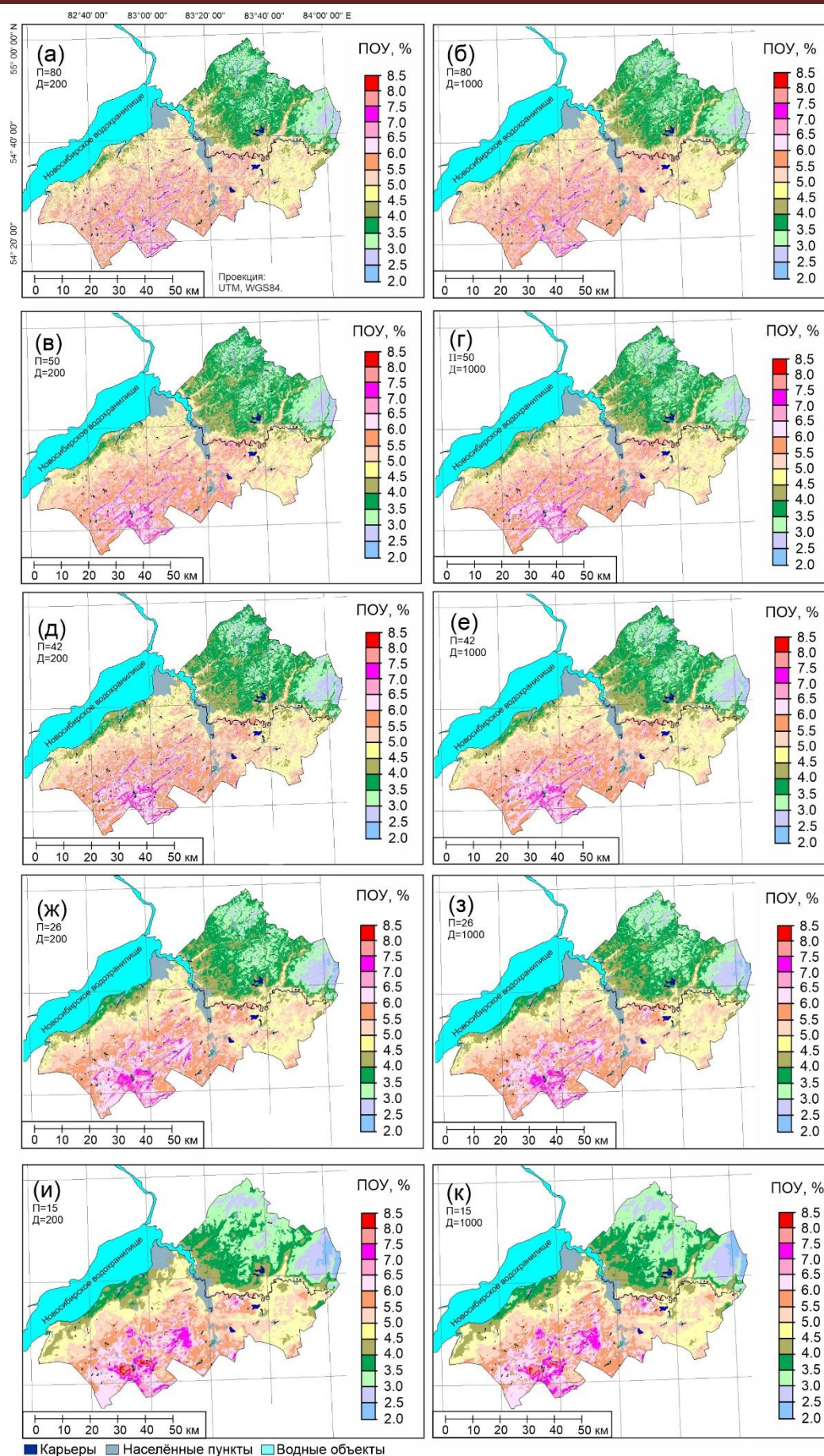


Рисунок 4. Карты содержания ПОУ (по обучающим данным 1984–1994 гг.) в слое 0–30 см, составленные на основе различного количества предикторов и «деревьев». Сокращения: П – количество предикторов, Д – количество «деревьев». Разрешение карт 30×30 м.

Распределение моделей в порядке убывания $R^2_{\text{внд}}$ было следующим (количество предикторов в наборе): 42 – 26 – 80 – 50 – 15 (табл. 4). На основании более высоких значений $R^2_{\text{внд}}$ (0,55) и более низких значений RMSE (1,25), карта содержания ПОУ, составленная с использованием 42 предикторов, выбрана в качестве лучшей (табл. 4, рис. 4 д). Увеличение в моделях числа деревьев до 1000 не привело к значительному увеличению $R^2_{\text{онд}}$ и $R^2_{\text{внд}}$ (табл. 4).

Сравнение фактических и предсказанных значений показало, что диапазон размаха без выбросов по содержанию ПОУ отличался значительно, однако отличия средних не выявлено (рис. 5). Предсказанный ПОУ во всех моделях имел меньший диапазон вариации по сравнению с фактическими значениями (рис. 5).

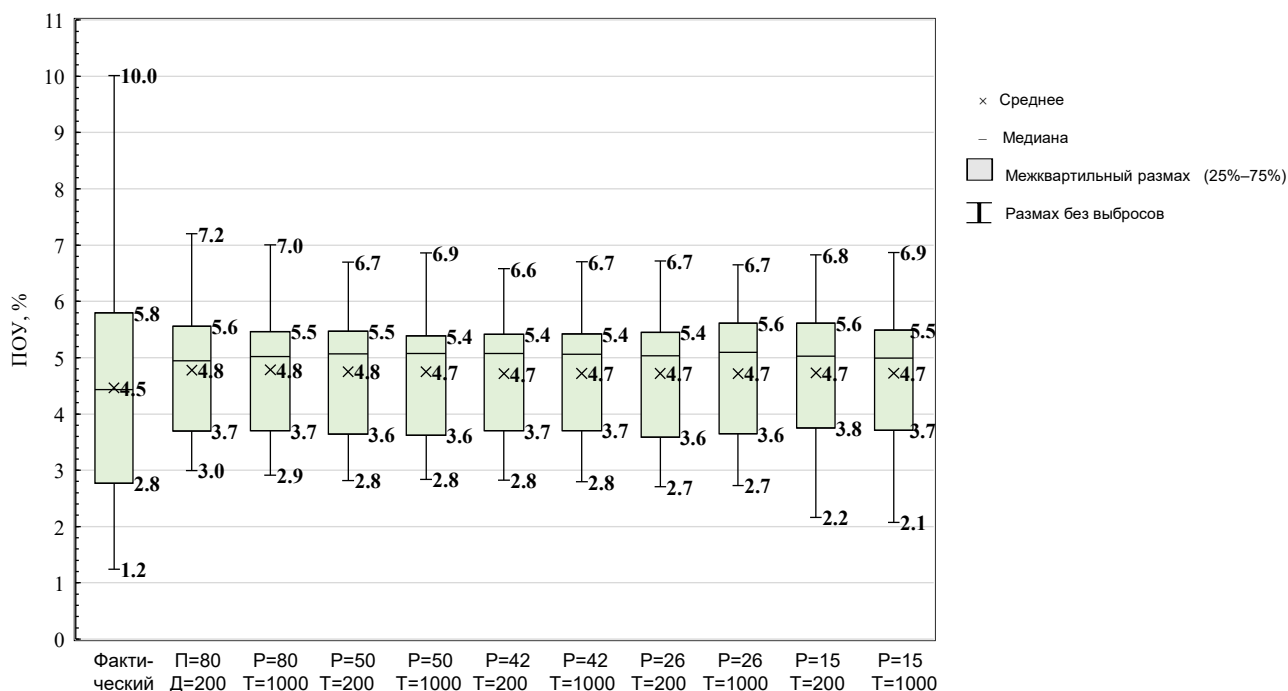


Рисунок 5. Сравнение фактического и предсказанного алгоритмом RF содержания ПОУ (по данным 1984–1994 гг.) в валидационном наборе данных ($n=55$). Сокращения: П – количество предикторов; Д – количество «деревьев» в модели.

Увеличение масштаба построенной карты (рис. 4д) на участке, где имелся набор данных по содержанию ПОУ за 2015 год с близким расположением точек отбора проб, и их наложение на карту показало приемлемое сходство с моделью, построенной по данным 1984–1994 годов, так как рядом с точкой отбора (красный крест на карте) имелись схожие/близкие значения по содержанию ПОУ (черные точки на карте) (рис. 6).

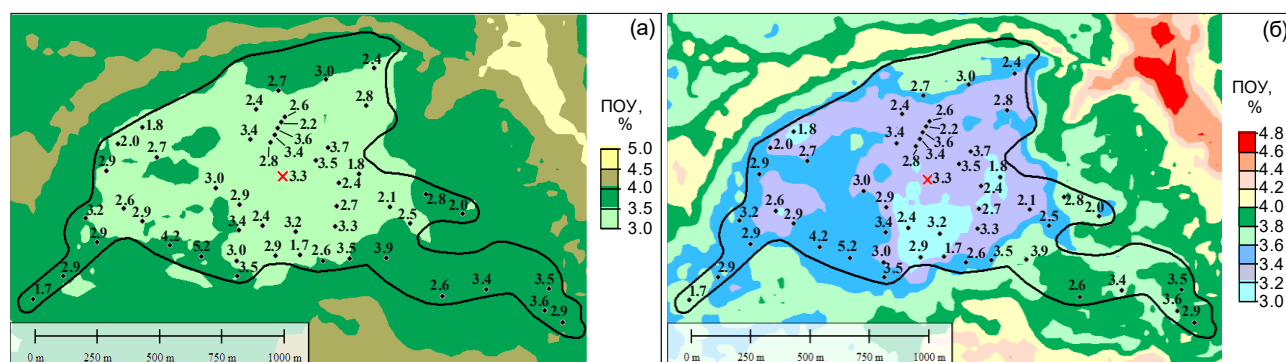


Рисунок 6. Сравнение предсказанного (по обучающим данным 1984–1994 гг.) и фактического (данные за 2015 г.) содержания ПОУ при увеличенном масштабе карты: (а) – шкала с шагом 0,5 по рис. 4д; (б) – шкала с шагом 0,2 по рис. 4д (для более детального рассмотрения). Примечание: цифры на картах возле чёрных точек представляют фактическое содержание ПОУ в 2015 году ($n=50$), красный крест – содержание ПОУ по базе данных 1984–1994 гг.

Однако полученные данные не позволяют доказать произошедшие изменения в содержании ПОУ с течением времени в связи с отсутствием установленного репера в 1984–1994 годах в том месте, где отбиралась почвенная проба (красный крест на карте). Иные варианты получения современных данных пробоотбора из этой точки будут некорректны из-за ошибки определения местоположения с использованием системы глобального позиционирования GPS (Global Positioning System), т.е. несмотря на то, что координаты точки известны, найти это место на местности без ошибки невозможно. Необходимо подчеркнуть, что данные 2015 года не использовались в процессе обучения моделей и картографирования содержания ПОУ алгоритмом RF. Они использовались только для наложения на карту ПОУ, созданную по данным 1984–1994 гг., чтобы качественно/визуально оценить объясняющую способность модели, построенную с помощью алгоритма RF, и возможные изменения в содержании ПОУ.

Содержание ПОУ увеличивается в юго-западном направлении (рис. 4д). Предсказанное среднее значение по содержанию ПОУ в 1,1–1,2 раза превышало среднее фактическое для следующих типов и подтипов почв: 1 – луговые аллювиальные / Eutric Fluvisols; 2 – луговые карбонатные / Eutric Gleysols; светло-серые лесные оподзоленные / Luvic Greyzemic Phaeozems; 8 – серые лесные оподзоленные / Luvic Greyzemic Phaeozems (рис. 7).

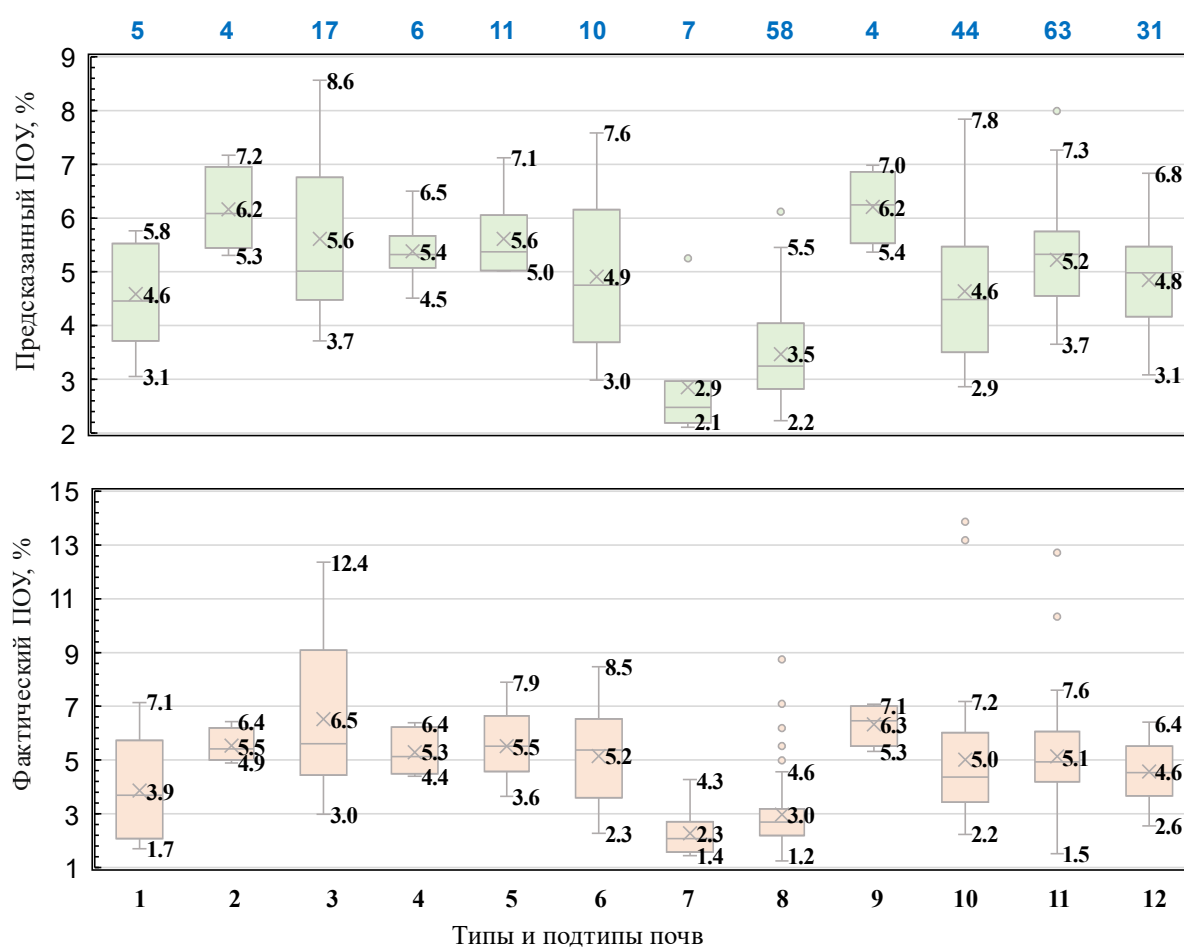


Рисунок 7. Вариабельность предсказанного (по рис. 4д) и фактического содержания ПОУ (по данным 1984–1994 гг.) в слое 0–30 см в зависимости от таксономических единиц почв ($n=261$). Условные обозначения почвенных таксономических единиц по классификации и диагностике почв СССР (Классификация ..., 1977) / мировой реферативной базе данных почвенных ресурсов WRB (IUSS Working Group ..., 2015): 1 – луговые аллювиальные / Eutric Fluvisols; 2 – луговые карбонатные / Eutric Gleysols; 3 – луговые подзолистые / Haplic Gleysols; 4 – луговые солончаковатые / Haplic Gleysols (Protosalic); 5 – лугово-черноземные обыкновенные / Gleyic Chernozems; 6 – лугово-черноземные оподзоленные / Greyzemic Gleyic Chernozems; 7 – светло-серые лесные оподзоленные / Luvic Greyzemic Phaeozems; 8 – серые лесные оподзоленные / Luvic Greyzemic Phaeozems; 9 – солонцы луговые / Gleyic Solonetz; 10 – темно-серые лесные оподзоленные / Luvic Greyzemic Phaeozems; 11 – чернозёмы выщелоченные / Luvic Chernozems; 12 – чернозёмы оподзоленные / Luvic Greyzemic Chernozems. Примечание: объем выборки обозначен синими цифрами сверху над диаграммами размаха.

Предсказанные средние значения по содержанию ПОУ были занижены в 1,1–1,2 раза по сравнению со средними фактическими для следующих типов и подтипов почв: 3 – луговые подзолистые / Haplic Gleysols; 6 – лугово-черноземные оподзоленные / Greyzemic Gleyic Chernozems; 10 – тёмно-серые лесные оподзоленные / Luvis Greyzemic Phaeozems (рис. 7). Для остальных типов и подтипов почв соответствие предсказанных и фактических средних значений удовлетворительное. Сравнение содержания ПОУ разных таксономических единиц почв показало, что, исходя из фактических данных, самые низкие средние значения характерны для светло-серых (№ 7) и серых лесных оподзоленных (№ 8) почв (рис. 7). Относительно высокие средние значения (>5,5%) ПОУ выявлены в следующих почвах: 3 – луговые подзолистые / Haplic Gleysols; 9 – солонцы луговые / Gleyic Solonchets; 2 – луговые карбонатные / Eutric Gleysols; 5 – лугово-черноземные обыкновенные / Gleyic Chernozems.

Учитывая высокую важность предикторов в цифровом картографировании содержания ПОУ, дополнительно проведен анализ их относительной степени важности по отдельным факторам почвообразования для того, чтобы понять какой вклад в итоговое изображение они вносят (рис. 8). Данный анализ также необходим для исключения некоторых климатических показателей, несмотря на то, что корреляции с большинством из них высокие и умеренные (табл. 3). Преобладание в модели предикторов с низким исходным разрешением может привести к недооценке других, не менее важных предикторов, имеющих лучшее исходное разрешение.

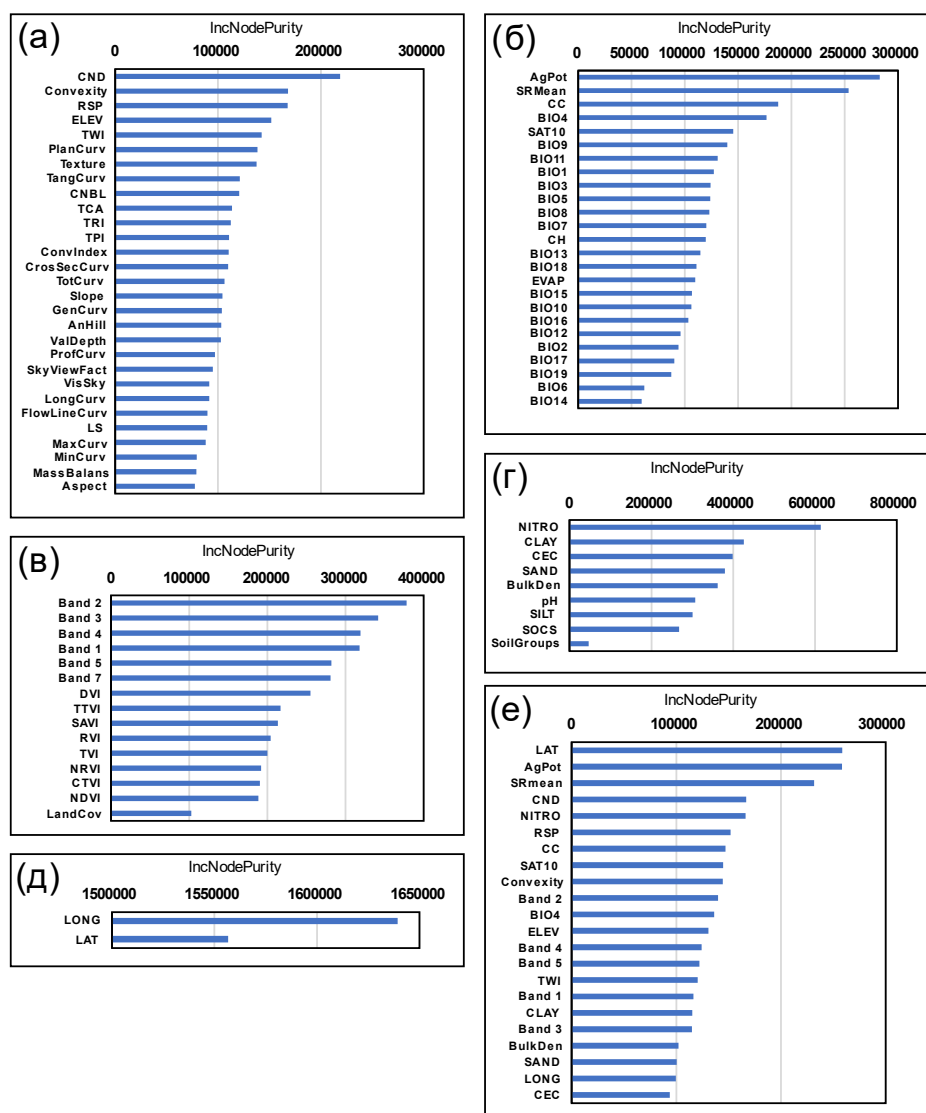


Рисунок 8. Относительная степень важности (индекс IncNodePurity) предикторов в моделях, построенных с использованием алгоритма RF и наборов предикторов, характеризующих разные группы факторов почвообразования (количество и в скобках название группы): а – 29 (рельеф); б – 25 (климат); в – 15 (растительность); г – 9 (почва); д – 2 (пространственное положение); е – 22 (доминирующие предикторы: по 5 первых из каждой группы (на основе рис. 8 а, б, в, г) + 2 (рис. 8 д)).

По 5 первых (доминирующих) предикторов из разных групп факторов почвообразования для картографирования содержания ПОУ выбраны следующие: рельеф – CND, Convexity, RSP, ELEV, TWI (рис. 8а); климат – AgPot, SRmean, CC, BIO4, SAT10 (рис. 8б); растительность – Band 2, Band 3, Band 4, Band 1, Band 5 (рис. 8в); почва – NITRO, CLAY, CEC, SAND, BulkDen (рис. 8г); пространственное положение – LONG, LAT (рис. 8д). Относительная степень важности вышеперечисленных предикторов в совмещенном наборе показывает, что лидирующее положение занял предиктор, характеризующий пространственное положение (LAT); далее по списку представлены предикторы, характеризующие климат, рельеф, почву (рис. 8е).

Обращают на себя внимание предикторы, характеризующие пространственное положение, а именно, при совместном использовании разных групп предикторов (рис. 3, 8е) такой показатель, как LAT, занимал лидирующие позиции по сравнению с LONG. Однако, степень важности LAT, оцененная только в индивидуальной группе (пространственное положение), была ниже LONG (рис. 8 д, е). Таким образом, в зависимости от состава предикторов в наборе, относительная степень их важности может кардинально меняться.

Среди климатических предикторов, интегральные показатели (AgPot, CC) занимали доминирующие позиции, в то время как среднегодовое количество осадков (BIO12) по степени важности находилось на более низких позициях в списке (рис. 8б).

У предикторов, характеризующих растительность, отражательная способность в различных каналах занимала доминирующие позиции, а вегетационные индексы по степени важности находились ниже (рис. 8в).

На основе перечисленных выше групп предикторов (рис. 8) построены карты содержания ПОУ с использованием алгоритма RF (рис. 9).

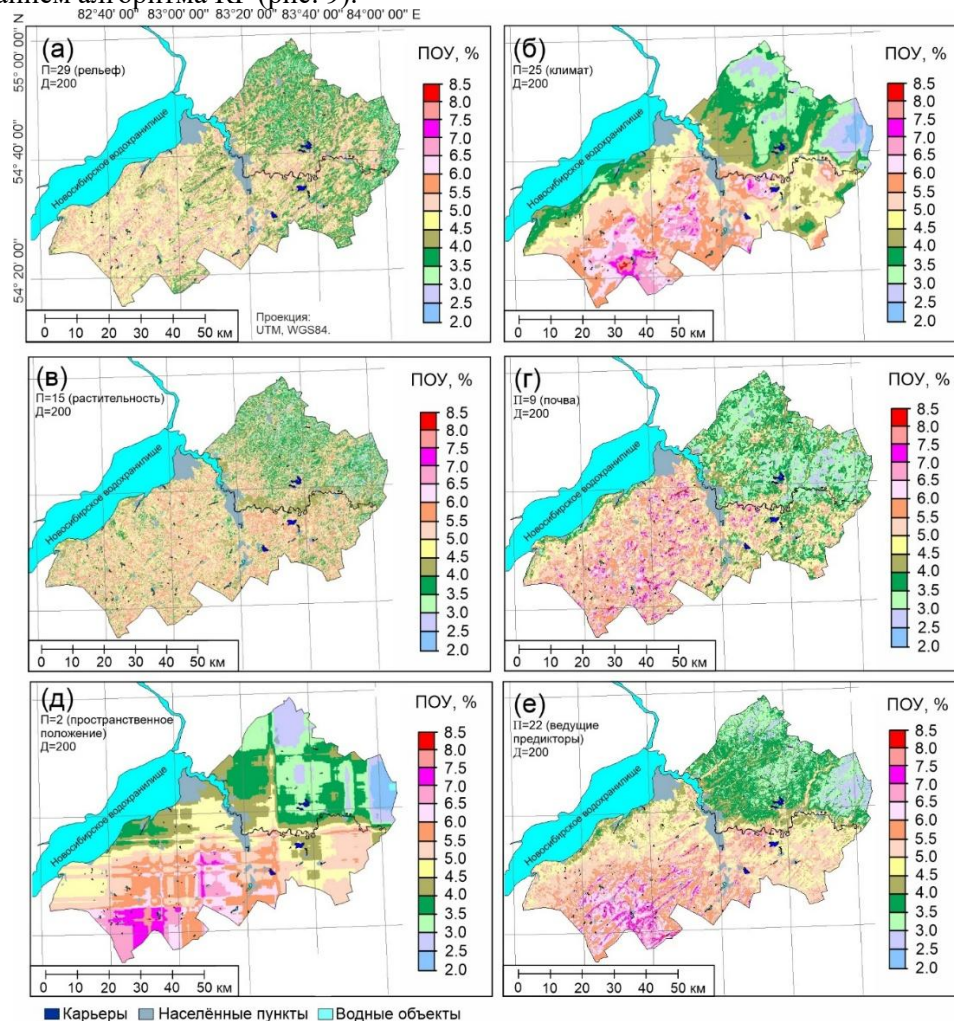


Рисунок 9. Карты содержания ПОУ (по данным 1984–1994 гг.) в слое 0–30 см, составленные на основе предикторов, характеризующих отдельные и совмещенные факторы почвообразования: а – 29 (рельеф); б – 25 (климат); в – 15 (растительность); г – 9 (почва); д – 2 (пространственное положение); е – 22 (все доминирующие предикторы: по 5 первых из каждой группы (рис. 8 а, б, в, г + 2 (рис. 8 д)). Сокращения: П – количество предикторов, Д – количество деревьев в моделях.

Эффективность моделирования содержания ПОУ алгоритмом RF с использованием наборов предикторов, указанных на рис. 8, представлена в табл. 5. Модели с разным количеством предикторов в порядке убывания $R^2_{\text{онд}}$ расположились следующим образом: 29 (рельеф) – 22 (доминирующие) – 9 (почва) – 25 (климат) – 15 (растительность) – 2 (пространственное положение). Распределение моделей в порядке убывания $R^2_{\text{внд}}$ было следующим (количество предикторов в наборе): 22 (доминирующие) – 25 (климат) – 9 (почва) – 2 (пространственное положение) – 29 (рельеф) – 15 (растительность) (табл. 5). $R^2_{\text{внд}}$ по сравнению с $R^2_{\text{онд}}$ у модели «29 (рельеф)» снизился в 11 раз, а у модели «15 (растительность)» – в 24 раза, что говорит о сильном снижении эффективности моделирования с использованием этих наборов предикторов, несмотря на то, что значения $R^2_{\text{онд}}$ у этих моделей были относительно высокими (табл. 5). Значение $\text{RMSE}_{\text{внд}}$ у модели «15 (растительность)» больше стандартного отклонения (1,8) в валидационном наборе данных (табл. 2, 5), что свидетельствует о неудовлетворительном качестве моделирования.

Таблица 5

Эффективность моделирования алгоритмом RF (200 «деревьев») с наборами предикторов, характеризующих отдельные и совмещенные факторы почвообразования

Количество предикторов (см. табл. 1)	Показатели эффективности моделирования				
	$R^2_{\text{онд}}$	$R^2_{\text{внд}}$	$\text{RMSE}_{\text{внд}}$	$\text{MAPE}_{\text{внд}}$	$\text{MAE}_{\text{внд}}$
			%		
29 (рельеф)	0,85	0,08	1,71	40,9	1,29
25 (климат)	0,79	0,47	1,32	26,5	0,96
15 (растительность)	0,71	0,03	1,85	45,7	1,52
9 (почва)	0,81	0,41	1,39	31,2	1,06
2 (пространственное положение)	0,68	0,39	1,44	29,9	1,07
22 (доминирующие предикторы: по 5 первых из каждой группы (рис. 8 а, б, в, г + 2 (рис. 8 д))	0,82	0,54	1,26	28,2	0,94

Наиболее характерно глобальный тренд в изменении содержания ПОУ выражен на картах, построенных с использованием предикторов, характеризующих климат (рис. 9б), почву (рис. 9г), пространственное положение (рис. 9д). На картах содержания ПОУ, составленных на основе наборов предикторов (рельеф, растительность), глобальный тренд выражен с отсечением минимальных и максимальных значений содержания ПОУ (рис. 9 а, в). При этом $R^2_{\text{онд}}$ у этих моделей высокие (0,85 и 0,71), а ошибки, оцененные по показателям эффективности модели ($\text{RMSE}_{\text{внд}}$, $\text{MAPE}_{\text{внд}}$, $\text{MAE}_{\text{внд}}$), значительно больше, чем у моделей, имеющих более низкий $R^2_{\text{онд}}$ (табл. 5). В совмещенном наборе предикторов (22) показатели эффективности моделирования ($\text{RMSE}_{\text{внд}}$, $\text{MAE}_{\text{внд}}$) были самыми лучшими и сравнимы с показателями модели, построенной на основе 42 предикторов (табл. 4, 5). Таким образом, подход с выбором только доминирующих предикторов в отдельных группах факторов почвообразования можно считать приемлемым для картографирования содержания ПОУ.

Предикторы, характеризующие пространственное положение (LAT, LONG), можно использовать только в сочетании с предикторами из других групп факторов почвообразования, так как карта ПОУ, составленная с использованием только этих двух предикторов, выглядит неправдоподобно из-за наличия вертикальных и горизонтальных полос (рис. 10д). Однако, в сочетании с другими предикторами, такой предиктор, как LAT, значительно улучшает показатели эффективности моделирования, так как занимает лидирующую позицию по степени важности (рис. 3, 9е).

Следующий этап нашего исследования состоял в увеличении на экране компьютера масштаба построенной карты (рис. 4д) на участке, где имелся набор фактических данных по содержанию ПОУ за 2015 год с близким расположением точек отбора проб (рис. 10). Наложение этих более детальных данных на итоговые карты ПОУ позволяет лишь приблизительно оценить качество моделирования и произошедшие временные изменения в содержании ПОУ. Такой подход относится к типу разведочного анализа данных или проверке предположений. Увеличение масштаба карт и наложение более подробных данных, пусть даже не соответствующих необходимому временному периоду, позволяет сделать важные выводы относительно дальнейшего использования предикторов, характеризующих разные факторы почвообразования. На увеличенных картах (рис. 10 б, г, д) видно, что предикторы из отдельных групп (климат, почва, пространственное положение) не способны предсказывать аккумулятивный эффект (увеличение содержания ПОУ в различного рода понижениях рельефа). Тогда как на картах содержания ПОУ, составленных с использованием предикторов от других факторов почвообразования (рельеф, растительность), аккумулятивный эффект отчетливо

просматривается в виде ареалов, повторяющих формы понижений (за границами поля со всех сторон имеются балки, лога, долины рек и др.), в которых наблюдается увеличение содержания ПОУ (рис. 10 а, в). Данное исследование не позволяет визуально показать (нет точек отбора проб за пределами поля в понижениях), что такое увеличение содержания ПОУ в этих ареалах имеется на самом деле, но тот факт, что при моделировании (рис. 3, 8е) такие предикторы как CND, Convexity, TWI присутствуют не в самых нижних позициях, всё же указывает на то, что эти закономерности накопления ПОУ в понижениях были выявлены по данным 1984–1994 гг.

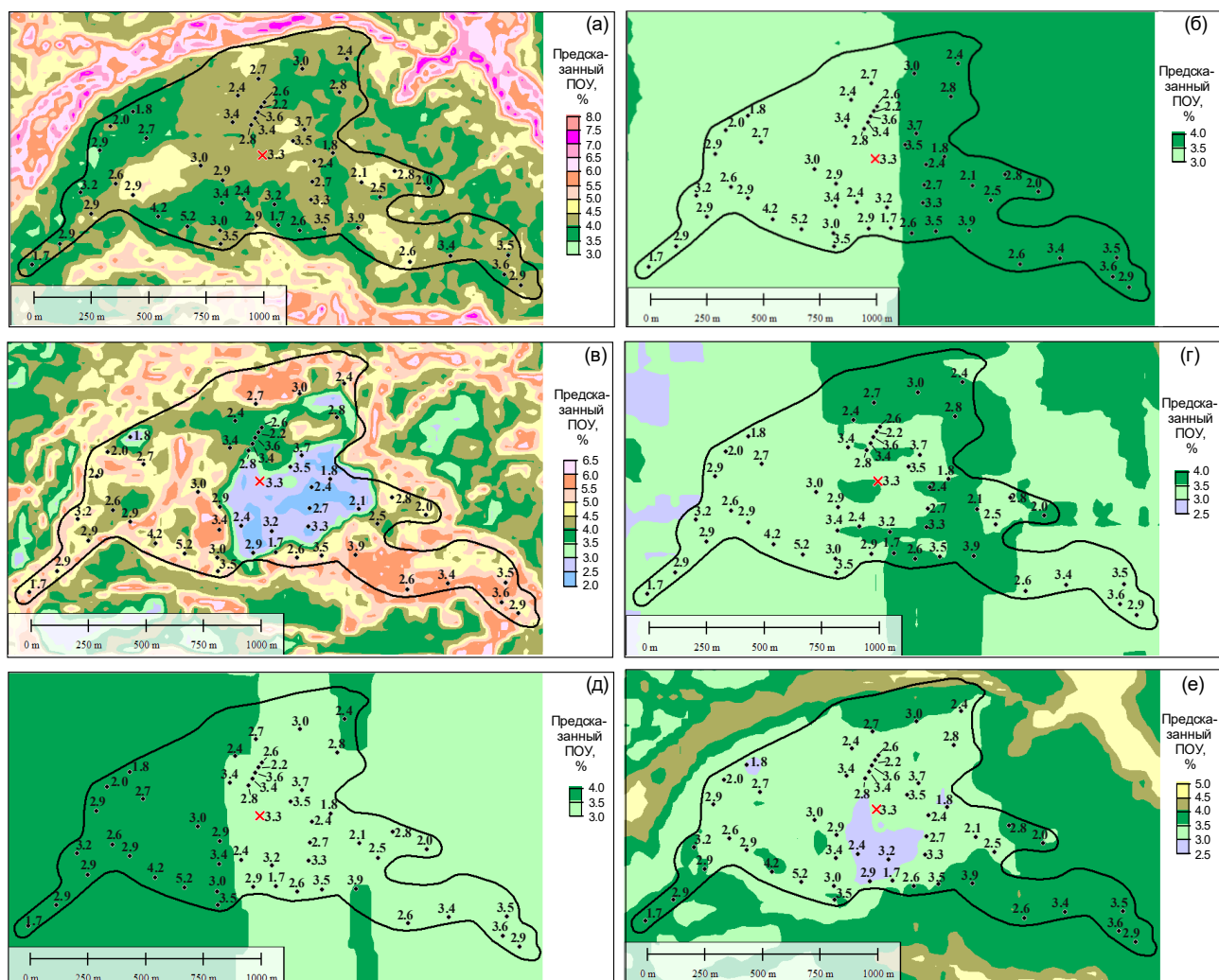
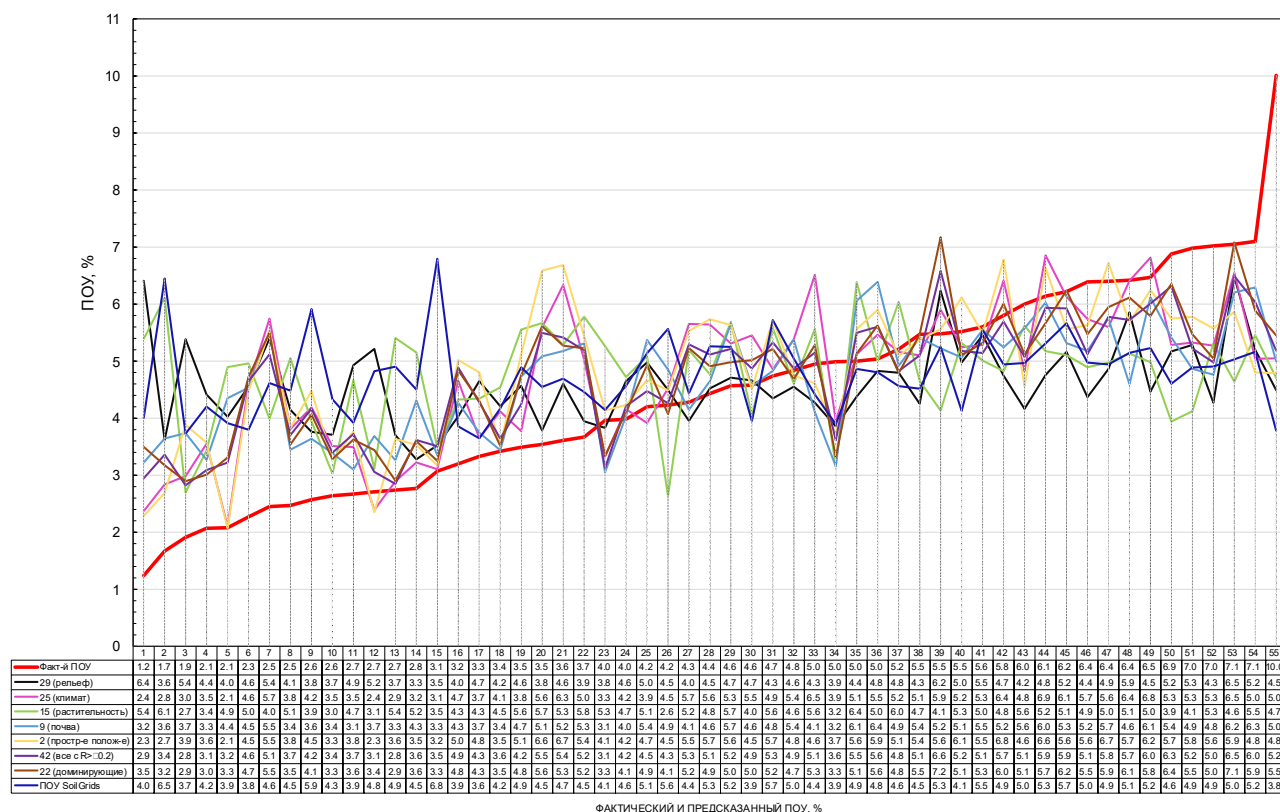


Рисунок 10. Сравнение предсказанного по отдельным и совмещённым факторам почвообразования (по данным 1984–1994 гг.) и фактического (данные за 2015 г.) содержания ПОУ в слое 0–30 см при увеличенном масштабе карты: а – 29 (рельеф, рис. 10а); б – 25 (климат, рис. 10 б); в – 15 (растительность, рис. 10 в); г – 9 (почва, рис. 10 г); д – 2 (пространственное положение, рис. 10 д); е – 22 (все доминирующие предикторы: по 5 первых из каждой группы (рис. 8 а, б, в, г + 2 (рис. 8 д)). Примечание: цифры над черными точками на картах представляют фактическое содержание ПОУ в слое 0–30 см в 2015 году ($n=50$), красный крест – фактическое содержание ПОУ по базе данных 1984–1994 гг.; черным контуром выделено поле (пахотное с/х угодье).

Анализ карт показал, что предикторы от разных групп факторов почвообразования вносят определенные закономерности в конечный результат картографирования содержания ПОУ и совместное их использование в плане улучшения показателей эффективности моделирования ($RMSE_{внд}$, $MAPE_{внд}$, $MAE_{внд}$) позволяет получить лучший результат (табл. 5, рис. 9е, 10е), чем при использовании предикторов по отдельности (табл. 5, рис. 9 а–д, 10 а–д). Одни группы предикторов (климат, почва, пространственное положение) позволяют отобразить на итоговой карте глобальный тренд в изменении содержания ПОУ, а другие (рельеф, растительность) – дифференцирующие/детализирующие тренды, учитывающие особенности рельефа и растительности. Таким образом, использование растровых карт предикторов с низким исходным разрешением (1×1 км

– WorldClim, 250×250 м – SoilGrids) и улучшенным до 30×30 м, в сочетании с картами предикторов среднего разрешения (рельеф, растительность, пространственное положение) позволяет достичь лучших результатов в картографировании содержания ПОУ.

На рисунке 11 показано, что наилучшим образом ход кривой фактических данных повторяют кривые, построенные по картам ПОУ, составленным с использованием следующих наборов предикторов: 42 (все с $R \geq 0,2$), 22 (доминирующие) и 25 (климат). В целом, все модели занизили относительно высокие значения ПОУ и завысили относительно низкие значения ПОУ, т.е. алгоритм RF уравнивает/усредняет предсказания по содержанию ПОУ (рис. 11). Обучающий и валидационный наборы данных содержали выбросы, которые все модели не предсказали. В пунктах отбора проб валидационной выборки прогноз для лучшей модели 42 (все с $R \geq 0,2$) был неточным в 2,4 и 1,9 раза для минимальных и максимальных значений по содержанию ПОУ, соответственно (точки 1 и 55). Предсказанные значения ПОУ имели меньший диапазон вариации (рис. 11).



ФАКТИЧЕСКИЙ И ПРЕДСКАЗАННЫЙ ПОУ, %

Рисунок 11. Сравнение предсказанных на основе разных наборов предикторов и фактических данных по содержанию ПОУ (1984–1994 гг.) в 0–30 см слое почв (валидационный набор данных, $n=55$). Примечание: номера точек валидационного набора данных указаны в первой (верхней) строке.

Ход кривой фактических данных хуже всего совпадает с кривой, построенной по карте ПОУ, составленной с использованием 15 предикторов, характеризующих только растительность (рис. 11). Использование этих предикторов при картографировании на региональном уровне, возможно, будет приводить к получению недостаточно качественных карт. Однако использование большего количества растительных показателей в наборе доминирующих предикторов (22) привело к появлению на карте ареалов с более низкими значениями ПОУ (от 2,5 до 3,0), которых нет на картах, составленных с использованием других предикторов (климат, рельеф, почва, пространственное положение); таких ареалов нет и на карте, составленной с использованием 42-х предикторов. Предсказанные значения по содержанию ПОУ в этих ареалах лучше совпадают с фактическими данными 2015 года (рис. 10 в, е).

Таким образом, можно сделать вывод, что предикторы из разных групп факторов почвообразования взаимно дополняют друг друга в совмещенном наборе доминирующих предикторов и позволяют получить лучший результат при картографировании содержания ПОУ, чем их использование по отдельности. Необходимо отметить, что на карте ПОУ, составленной с использованием 42 предикторов, нет ареалов со значениями ПОУ от 2,5 до 3,0%, которые есть на карте, составленной с использованием 22 предикторов. По всей видимости, это говорит о том, что у

модели 42 (все с $R \geq 0,2$) используется избыточное количество других предикторов, к которым, например, можно отнести климатические переменные, находящиеся по степени важности в нижних позициях списка (рис. 3 д). Это можно связать и с использованием большего количества растительных показателей в модели с 22 предикторами по сравнению с набором, состоящим из 42 предикторов. Следовательно, можно сделать вывод, что избыточное количество предикторов из одной группы факторов почвообразования может привести, например, к снижению детальности итоговой карты или наоборот. Кроме того, это свидетельствует, что доля/количество предикторов из каждой группы оказывает влияние на детальность итоговой карты ПОУ.

В настоящем исследовании в качестве предикторов для картографирования содержания ПОУ были использованы глобальные почвенные карты SoilGrids (табл. 1), поэтому следующий этап данной работы состоял в визуальном сравнении карты ПОУ от SoilGrids с лучшими картами, построенными нами (рис. 12).

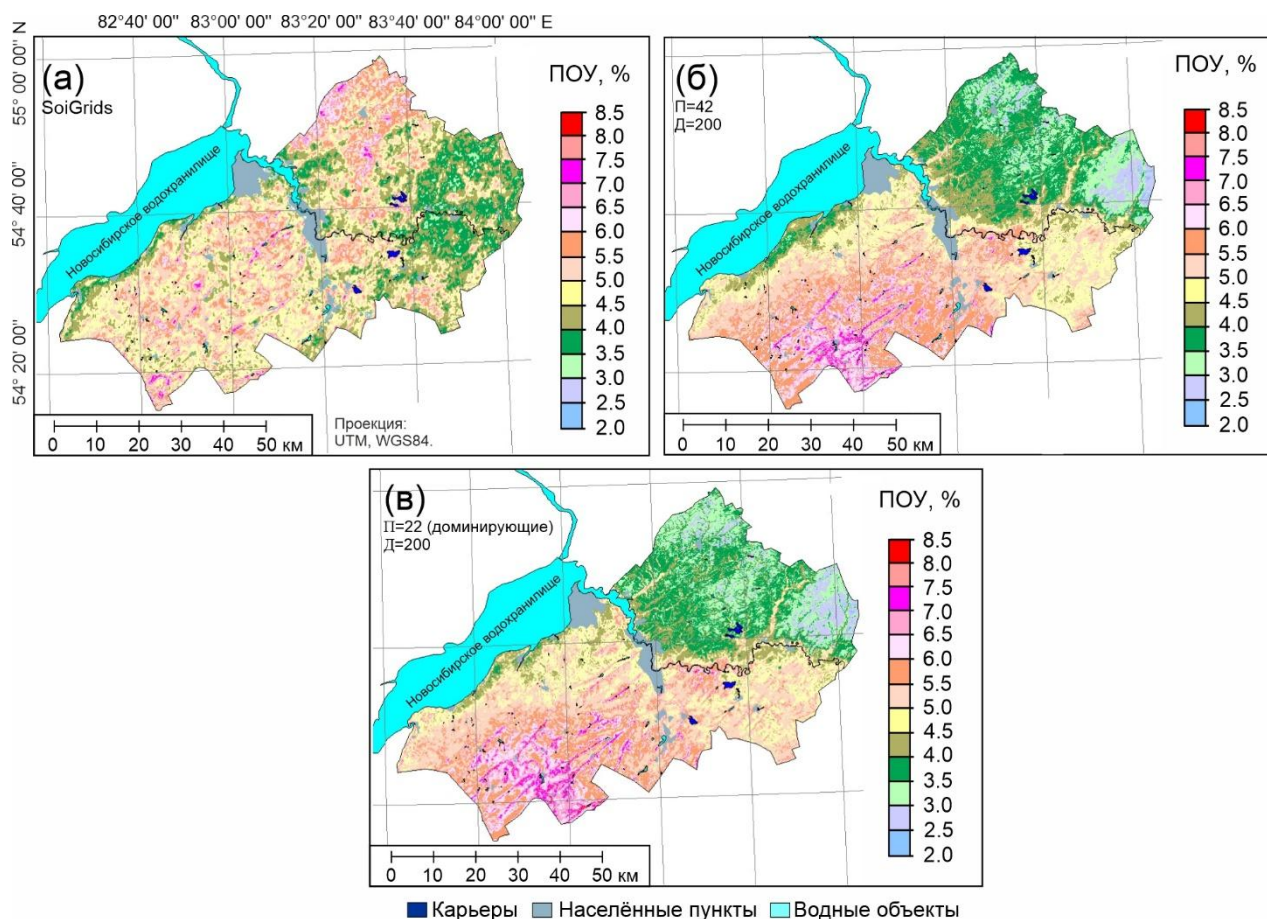


Рисунок 12. Карты содержания ПОУ: а – SoilGrids; б – 42 (все с $R \geq 0,2$); в – 22 (доминирующие).

Следует отметить, что глобальные карты имеют определенные минусы, например, в некоторых местах могут встречаться артефакты, локализацию которых необходимо выявлять, и, по всей видимости, принимать меры по инициированию исправлений. Другой минус этих карт состоит в том, что нет информации о местоположении почвенных профилей на исследуемой территории, поэтому судить о репрезентативности обучающей выборки, использованной при построении карт ПОУ SoilGrids, очень сложно. Подчеркнем, что подобное сравнение карт следует считать исключительно разведочным, так как усреднение растровых карт SoilGrids в нашей работе проведено не по стандарту. Согласно действующим рекомендациям (FAO and ITPS, 2020), для получения значений содержания ПОУ для заданной мощности слоя (0–30 см) необходимо предварительно провести гармонизацию значений из разных интервалов глубин почвенного профиля, так как растровой карты содержания ПОУ для слоя 0–30 см в проекте SoilGrids нет (<https://soilgrids.org/>). Поэтому усреднение готовых растровых карт содержания ПОУ, построенных для глубин 0–5, 5–15, 15–30 см, и последующее сравнение с полученными в нашем исследовании картами позволяет сделать выводы исключительно о трендах в изменении содержания ПОУ; при этом вести речь о точности этой карты будет некорректно, так как первоначальная гармонизация данных профилей почв для необходимой мощности не проведена, в

связи с отсутствием у автора данной работы исходных данных SoilGrids. Однако, несмотря на эти сложности, карта содержания ПОУ SoilGrids в настоящее время является чуть ли не единственной глобальной картой и её определенно необходимо использовать для разведочного и сравнительного анализа в исследованиях. Сравнительный анализ карт показал, что на карте SoilGrids имеется явно выраженный тренд увеличения содержания ПОУ в северо-западной части исследуемой нами территории (рис. 12а). Такого тренда нет на построенных в нашем исследовании лучших картах содержания ПОУ (рис. 12б, в). Репрезентативность выборки в проведенном исследовании, несомненно, выше, поэтому можно сделать заключение о наличии локальных завышений значений содержания ПОУ на картах SoilGrids, что, по всей видимости, обусловлено наличием недостаточного количества исходных данных, использованных в качестве обучающей выборки при моделировании с использованием алгоритма машинного обучения. Завышение значений ПОУ на карте SoilGrids по отношению к фактическим данным валидационной выборки заметно на рисунке 11 (первые 16 точек валидационного набора данных). Таким образом, сравнение карт показало, что потенциал алгоритмов машинного обучения, используемых в картографии, может снижаться в зависимости от объема обучающего набора и наличия в нём вариативных почвенных данных, охватывающих, по возможности, всю территорию исследования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основная задача нашего исследования заключалась в определении показателей эффективности моделирования содержания ПОУ с использованием 11 наборов предикторов и алгоритма Random Forest, реализованного на онлайн-платформе Google Earth Engine. Из 11 наборов предикторов для моделирования содержания ПОУ в слое 0–30 см был выбран лучший набор, состоящий из 42 предикторов. Использование этого набора предикторов показало лучшую эффективность моделирования ($R^2_{\text{онд}}=0,83$; $R^2_{\text{внд}}=0,55$; $\text{RMSE}_{\text{внд}}=1,25$). Обучающий и валидационный наборы данных содержали выбросы, которые все модели не предсказали. В пунктах отбора проб валидационной выборки прогноз для лучшей модели 42 (все с $R > \pm 0,2$) был неточным в 2,4 и 1,9 раза для минимальных и максимальных значений содержания ПОУ, соответственно. Предсказанные значения ПОУ имели меньший диапазон вариации. Сравнение средних значений в выборках показало, что увеличение количества «деревьев» с 200 до 1000 не привело к существенному улучшению показателей эффективности моделирования.

Содержание ПОУ в изученных почвах варьирует от 1,2 до 13,9% по фактическим данным. Согласно построенной карте, содержание ПОУ увеличивается в юго-западном направлении. Предсказанные моделью средние значения по отношению к среднему фактическому содержанию ПОУ были в 1,1–1,2 раза выше для четырех типов и подтипов почв (луговые аллювиальные, луговые карбонатные, светло-серые лесные оподзоленные, серые лесные оподзоленные), в то время как для трех типов почв они были в 1,1–1,2 раза ниже (луговые подзолистые, лугово-черноземные оподзоленные, темно-серые лесные оподзоленные). Для пяти типов и подтипов почв соответствие предсказанных и фактических средних значений удовлетворительное (луговые солончаковатые, лугово-черноземные обыкновенные, солонцы луговые, черноземы выщелоченные, черноземы оподзоленные).

Использование растровых карт предикторов с низким исходным разрешением (1×1 км – WorldClim, 250×250 м – SoilGrids) и улучшенным до 30×30 м, в сочетании с картами предикторов среднего разрешения (рельеф, растительность, пространственное положение), позволяет достичь лучших результатов в картографировании содержания ПОУ. Одни группы предикторов (климат, почва, пространственное положение) позволяют отобразить на итоговой карте глобальный тренд в изменении содержания ПОУ, а другие (рельеф, растительность) – дифференцирующие/детализирующие тренды, учитывающие особенности рельефа и растительности.

Согласно исследованию (Arrouays et al., 2020), для создания цифровых почвенных карт в государственном и частном секторах требуются стандарты, чтобы предотвратить получение некачественной информации, которая может ввести в заблуждение и привести к обратным результатам. В частности, необходимо ввести минимальные статистические стандарты для оценки карт, составленных с использованием методов цифрового картографирования. По нашему мнению, землепользователям необходимо предоставлять графический материал, показывающий, во сколько раз модель превысила или недооценила значения конкретного почвенного показателя в валидационном/независимом наборе данных с близким расположением точек отбора образцов. Для усовершенствования методологии оценки эффективности моделирования необходимо, чтобы валидационные/независимые наборы данных были расположены как в районах с низким содержанием

ПОУ, так и в районах с его высоким содержанием, например, в юго-восточной и северо-восточной части исследуемого региона (на примере исследуемого участка в нашей работе).

В большинстве исследований используются почвенные базы данных, созданные в разные годы (Чернова и др., 2021; FAO and ITPS, 2020; Poggio et al., 2021), в которых не рассматривается вопрос о проверке достоверности результатов моделирования по устаревшим и современным данным, которые часто используются совместно. Трудоемкость проведения полевых исследований почв не позволяет в короткие сроки создать полноценные базы данных для проведения цифрового картографирования свойств почв, а также независимые наборы данных для проверки точности карт, в связи с чем, проблемы цифрового картографирования свойств почв сохраняют свою актуальность и в настоящее время.

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

Аринушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. Москва: Издательство МГУ, 1970. 488 с.

Афанасьев В.Н., Цыпин А.П. Эконометрика в пакете STATISTICA: учебное пособие по выполнению лабораторных работ. Оренбург: ГОУ ОГУ, 2008. 204 с.

Гопп Н.В. Использование почвенно-геоморфологической базы данных для изучения пространственной изменчивости содержания гумуса, физической глины и ила в почвах Кузнецко-Салаирской геоморфологической провинции // Почвоведение. 2021. № 7. С. 783–796. <https://doi.org/10.31857/S0032180X21070054>

Гопп Н.В. Агроэкологический потенциал западной части Кузнецко-Салаирской геоморфологической провинции: методика цифрового картографирования, геопространственный анализ, корреляция с содержанием органического углерода в почвах // Почвы и окружающая среда. 2023. Том 6. № 3. с224. <https://doi.org/10.31251/pos.v6i3.224>

Гопп Н.В., Мешалкина Ю.Л., Нарыкова А.Н., Плотникова А.С., Чернова О.В. Картографирование содержания и запасов органического углерода почв на региональном и локальном уровнях: анализ современных методических подходов // Вопросы лесной науки. 2023. Том 6. № 1. С. 14–73. <https://doi.org/10.31509/2658-607x-202361-120>

Гопп Н.В., Нечаева Т.В. Цифровое картографирование содержания и запасов органического углерода в почвах склона (на примере ключевого участка в Предсалаирье) // Материалы Международной научно-практической конференции «Проблемы плодородия почв в современном земледелии», посвященной 70-летию освоения целинных и залежных земель (Красноярск, 24–28 июня 2024 г.). Красноярск: ФИЦ КНЦ СО РАН, 2024. С. 403–407.

Евдокимова Т.И. Почвенная съемка. Москва: Изд-во МГУ, 1987. 270 с.

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.

Романова А.И., Маханцева В.А., Волкова Т.Ю., Лебедева Т.Н., Журавлева А.И., Митрохина Е.С., Курганова И.Н., Иващенко К.В. Пространственно-временной анализ почвенных показателей углеродного цикла в постагрогенных экосистемах южного Подмоскovie // Почвы и окружающая среда. 2024. Том 7. № 3. с261. <https://doi.org/10.31251/pos.v7i3.261>

Сляднев А.П. Почвенно-климатический атлас Новосибирской области. Новосибирск: Наука, 1978.

Чернова О.В., Голозубов О.М., Алябина И.О., Щепашенко Д.Г. Комплексный подход к картографической оценке запасов органического углерода в почвах России // Почвоведение. 2021. № 3. С. 273–286. <https://doi.org/10.31857/S0032180X21030047>

Шарков И.Н., Антипина П.В. Некоторые аспекты углерод-секвестрирующей способности пахотных почв // Почвы и окружающая среда. 2022. Том 5. № 2. с175. <https://doi.org/10.31251/pos.v5i2.175>

Arrouays D., McBratney A., Bouma J., Libohova Z., Richer-de-Forges A.C., Morgan C.L.S., Roudier P., Poggio L., Mulder V.L. Impressions of digital soil maps: The good, the not so good, and making them ever better // Geoderma Regional. 2020. Vol. 20. e00255. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00255>

Breiman L. Random forests // Machine learning. 2001. Vol. 45. No. 1. P. 5–32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>

- Conrad O., Bechtel B., Bock M., Dietrich H., Fischer E., Gerlitz L., Wehberg J., Wichmann V., Böhner J. System for automated geoscientific analyses (SAGA) v. 2.1.4 // Geoscientific model development. 2015. Vol. 8. No. 7. P. 1991–2007. <https://doi.org/10.5194/gmd-8-1991-2015>
- Cutler D.R., Edwards T.C.Jr., Beard K.H., Cutler A., Hess K.T., Gibson J., Lawler J.J. Random forests for classification in Ecology // Ecology. 2007. Vol. 88. No. 1. P. 2783–2792. <https://doi.org/10.1890/07-0539.1>
- Defourny P., Lamarche C., Bontemps S., De Maet T., Van Bogaert E., Moreau I., Brockmann C., Boettcher M., Kirches G., Wevers J., Santoro M., Ramoino F., Arino O. Land Cover Climate Change Initiative – Product User Guide v2. 2017. Issue 2.0. http://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/download/ESACCI-LC-Ph2-PUGv2_2.0.pdf
- Defourny P., Lamarche C., Brockmann C., Boettcher M., Bontemps S., De Maet T., Duveiller G. L., Harper K., Hartley A., Kirches G., Moreau I., Peylin P., Ottlé C., Radoux J., Van Bogaert E., Ramoino F., Albergel C., Arino O. Observed annual global land-use change from 1992 to 2020 three times more dynamic than reported by inventory-based statistics, in preparation, 2023. URL: <https://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/index.php> (дата обращения 11.11.2024 г.).
- Duarte E., Zagal E., Barrera J.A., Dube F., Casco F., Hernández A.J. Digital mapping of soil organic carbon stocks in the forest lands of Dominican Republic // European journal of remote sensing. 2022. Vol. 55. No. 1. P. 213–231. <https://doi.org/10.1080/22797254.2022.2045226>
- Erunova M.G., Yakubailik O.E. Geomorphometric analysis of agricultural areas based on the FABDEM digital elevation model // InterCarto. InterGIS. 2024. Vol. 30. No. 2. P. 252–262. <https://doi.org/10.35595/2414-9179-2024-2-30-252-262>
- FAO. Standard operating procedure for soil organic carbon: Tyurin spectrophotometric method. Rom: FAO, 2021. URL: <https://www.fao.org/3/cb4757en/cb4757en.pdf> (дата обращения 11.11.2024 г.).
- FAO and ITPS. Global Soil Organic Carbon Map V1.5: Technical report. Rome, FAO, 2020. P. 169.
- Fick S.E., Hijmans R.J. WorldClim 2: new 1 km spatial resolution climate surfaces for global land areas // International Journal of Climatology. 2017. Vol. 37. No. 12. P. 4302–4315. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>
- Gandhi U. JavaScript and the Earth Engine API. In book: Cloud-Based Remote Sensing with Google Earth Engine / J.A. Cardille, M.A. Crowley, D. Saah, N.E. Clinton (eds). Cham: Springer, 2023. P. 3–18. https://doi.org/10.1007/978-3-031-26588-4_1
- Gorelick N., Hancher M., Dixon M., Ilyushchenko S., Thau D., Moore R. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone // Remote sensing of Environment. 2017. Vol. 202. P. 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
- Hawker L., Uhe P., Paulo L., Sosa J., Savage J., Sampson C., Neal J. A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed // Environmental Research Letters. 2022. Vol. 17. No. 2. P. 024016. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac4d4f>
- Hengl T.A. Practical guide to geostatistical mapping of environmental variables. EC JRC, Ispra (Italy), 2007. 165 p.
- Ignatenko V., Surkov A., Koltcov S. Random forests with parametric entropy-based information gains for classification and regression problems // PeerJ Computer Science. 2024. Vol. 10. e1775. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.1775>
- IPCC. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Vol. 4: Agriculture, forestry and other types of land use. Japan: IGES, 2006.
- IUSS. Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. Update 2015. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome, 2015. <https://www.fao.org/3/i3794en/i3794en.pdf>
- Luo C., Zhang X., Meng X., Zhu H., Ni C., Chen M., Liu H. Regional mapping of soil organic matter content using multitemporal synthetic Landsat 8 images in Google Earth Engine // Catena. 2022. Vol. 209. P. 105842. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105842>
- Moquedace C.M., Baldi C.G.O., Siqueira R.G., Cardoso I.M., Souza E.F.M., Fontes R.L.F., Francelino M.R., Gomes L.C., Fernandes-Filho E.I. High-resolution mapping of soil carbon stocks in the western Amazon // Geoderma Regional. 2024. Vol. 36. e00773. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2024.e00773>
- O'Brien L. Mpspline2: Mass-Preserving Spline Functions for Soil Data. 2022. Available online: <https://CRAN.R-project.org/package=mpspline2> (дата обращения 14.12.2024).
- Poggio L., de Sousa L., Batjes N., Heuvelink G., Kempen B., Ribeiro E., Rossiter D. SoilGrids 2.0: producing soil information for the globe with quantified spatial uncertainty // Soil. 2021. Vol. 7. No. 1. P. 217–240. <https://doi.org/10.5194/soil-7-217-2021>
- R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria, 2022. <https://www.R-project.org/>

Rodriguez-Galiano V.F., Ghimire B., Rogan J., Chica-Olmo M., Rigol-Sanchez J.P. An assessment of the effectiveness of a random forest classifier for land-cover classification. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2012. 67. P. 93–104. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2011.11.002>

Singh J., Knapp H.V., Demissie M. Hydrologic modelling of the Iroquois River watershed using HSPF and SWAT. Illinois State Water Survey Contract Report 2004-08. Illinois State Water Survey, Champaign. 2004. <http://www.isws.illinois.edu/pubdoc/CR/ISWSCR2004-08.pdf>

Suleymanov A., Tuktarova I., Belan L., Suleymanov R., Gabbasova I., Araslanova L. Spatial prediction of soil properties using random forest, k-nearest neighbors and cubist approaches in the foothills of the Ural Mountains, Russia // *Modelling Earth System and Environment*. 2023. Vol. 9. No. 3. P. 3461–3471. <https://doi.org/10.1007/s40808-023-01723-4>

Zhang F., Wen N. Carbon price forecasting: a novel deep learning approach // *Environmental Science and Pollution Research*. 2022. Vol. 29. No. 36. P. 54782–54795. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19713-x>

Zhou T., Wenhao L.W., Geng Y., Xiao S., Chen J., Xu X., Pan J., Si B., Lausch A. National-scale spatial prediction of soil organic carbon and total nitrogen using long-term optical and microwave satellite observations in Google Earth Engine // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2023. Vol. 210. P. 107928. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.107928>

Поступила в редакцию 12.09.2025

Принята 14.10.2025

Опубликована 17.10.2025

Сведения об авторе:

Гопп Наталья Владимировна – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории географии и генезиса почв ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск, Россия); natalia.gopp@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-7549-2984>

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.



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

Digital mapping of soil organic carbon content in the Kuznetsk-Salair geomorphological province using the Google Earth Engine platform

© 2025 N. V. Gopp 

Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Lavrentieva 8/2, Novosibirsk, Russia. E-mail: natalia.gopp@gmail.com

The aim of this study was to create digital maps of soil organic carbon (SOC) content in the 0–30 cm layer using 11 different predictor datasets and the Random Forest algorithm implemented on the Google Earth Engine platform.

Location and time of the study. The study was carried out in the Kuznetsk-Salair geomorphological province, within the Iskitimsky district in the Novosibirsk Region.

Methods. Digital mapping was performed using the Random Forest (RF) algorithm with settings of 200 and 1000 "trees". RF algorithm is implemented on the Google Earth Engine online platform in the form of a script (code). SOC content was mapped using raster predictor maps that characterized the following soil-forming factors: climate, relief, vegetation, spatial position, and soil properties. The number of predictors used in the modeling varied depending on the number of available indicators and the correlation coefficient (R) between the SOC content and the predictor values. The following numbers of predictors were used: 80 (all); 2) 50 (all with $R > \pm 0,1$); 3) 42 (all with $R > \pm 0,2$); 4) 26 (all with $R > \pm 0,3$); 5) 15 (all with $R > \pm 0,4$). Additionally, the SOC content was mapped using five sets of predictors characterizing individual soil formation factors (relief, climate, vegetation, soil, spatial position), and one dataset combining five dominant predictors from each soil formation factor. Thus, a total of 11 sets of predictors was used, the sets presented both in various combinations of indicators of soil formation factors and individually. Training (TD, $n=206$) and validation (VD, $n=55$) data sets were used in the study. The database was created using archival materials from the "Zapsibgiprozem" Land Management Institute from 1984 to 1994. It contains data on the SOC content in the 0–30 cm layer, with a sample size of 261.

Results. The optimal model for mapping SOC content in the 0–30 cm layer, based on 42 predictors and 200 trees, demonstrated the highest accuracy. The simulation performance indicators are as follows: $R^2_{TD}=0,83$, $R^2_{VD}=0,55$; $RMSE_{VD}=1,25\%$. Model performance indicators showed that the model performed well. According to the actual

data, the SOC content ranged from 1,2 to 13,9%. The generated map showed that the highest SOC levels were found in the southwestern part of the study area.

Conclusions. The use of raster maps of predictors with low original resolution (1×1 km – WorldClim, 250×250 m – SoilGrids) improved to 30×30 m, combined with medium-resolution predictor maps (topography, vegetation, spatial location), allows for better results in digital mapping of SOC. Some groups of predictors (climate, soil, spatial location) provide a global trend in the variation of SOC content in the final map, while others (topography, vegetation) display differentiating/detailing trends that take into account the characteristics of the terrain and vegetation. Thus, predictors characterizing different soil formation factors complement each other in the combined predictor dataset and enable development of more detailed maps during SOC mapping.

Keywords: digital mapping; organic carbon content; soils; WorldClim; West Siberia; WorldClim; FABDEM; SoilGrids; Landsat 5; SAGA GIS.

How to cite: Gopp N.V. Digital mapping of soil organic carbon content in the Kuznetsk-Salair geomorphological province using the Google Earth Engine platform. *The Journal of Soils and Environment*. 2025. 8(3). e335. DOI: [10.31251/pos.v8i3.335](https://doi.org/10.31251/pos.v8i3.335) (in Russian with English abstract).

FUNDING

The work was carried out as a part of the most important innovative project of national importance «Development of a System of Ground-based and Remote Monitoring of Carbon Pools and Greenhouse Gas Flows on the Territory of the Russian Federation, ensuring the Creation of a System for Recording Data on the Fluxes of Climate-active Substances and Carbon Budget in Forests and other Terrestrial Ecological Systems» (reg. No. 123030300031-6).

REFERENCES

- Arinushkina E.V. Guidelines for the Chemical Analysis of Soils. Moscow: Moscow State University Publishing House, 1970. 488 p. (in Russian).
- Afanasyev V.N., Tsylin A.P. Econometrics in the STATISTICA package: guidelines for the laboratory work. Orenburg: OSU, 2008. 204 p. (in Russian).
- Gopp N.V. The Use of the Soil-Geomorphological Database for Studying the Spatial Variability of the Humus Content, Physical Clay, and Clay in the Soils of the Kuznetsk–Salair Geomorphological Province. *Eurasian Soil Science*. 2021. Vol. 54. No. 7. P. 986–998. <https://doi.org/10.1134/S106422932107005X>
- Gopp N.V. Agroecological potential of the western part of the Kuznetsk-Salair geomorphological province: digital mapping methodology, geospatial analysis, correlation with soil organic carbon content. *The Journal of Soils and Environment*. 2023. Vol. 6. No. 3. e224. (in Russian). <https://doi.org/10.31251/pos.v6i3.224>
- Gopp N.V., Meshalkina J.L., Narykova A.N., Plotnikova A.S., Chernova O.V. Mapping of soil organic carbon content and stocks at the regional and local levels: the analysis of modern methodological approaches. *Forest Science Issues*. 2023. Vol. 6. No. 1. P. 14–73. (in Russian). <https://doi.org/10.31509/2658-607x-202361-120>
- Gopp N.V., Nechaeva T.V. Digital mapping of organic carbon content and stocks in soils on the slope (using the example of a key site in the Cis-Salair drained plain). In book: Problems of soil fertility in modern agriculture. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference Materials dedicated to the 70th anniversary of the development of virgin and fallow lands (Krasnoyarsk, 24–28 June, 2024). Krasnoyarsk: KSC SB RAS, 2024. P. 403–407. (in Russian).
- Evdokimova T.I. Soil survey. Moscow: Publishing house of Moscow State University, 1987. 270 p. (in Russian).
- 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. Frieve. Moscow: Kolos Publ., 1977. 224 p. (in Russian).
- Romanova A.I., Makhantseva V.A., Volkova T.Yu., Lebedeva T.N., Zhuravleva A.I., Mitrokhina E.S., Kurganova I.N., Ivashchenko K.V. Spatio-temporal analysis of soil indicators of the carbon cycle in some postagrogenic ecosystems of the southern Moscow region. *The Journal of Soils and Environment*. 2024. Vol. 7. No. 3. e261. (in Russian). <https://doi.org/10.31251/pos.v7i3.261>
- Slyadnev A.P. Soil and climatic atlas of the Novosibirsk region. Novosibirsk: Nauka Publ., Siberian Branch, 1978. 122 p. (in Russian).
- Chernova O.V., Golozubov O.M., Alyabina I.O., Shepashchenko D.G. Integrated Approach to Spatial Assessment of Soil Organic Carbon in Russian Federation. *Eurasian Soil Science*. 2021. Vol. 54. No. 3. P. 325–336. <https://doi.org/10.1134/S1064229321030042>
- Sharkov I.N., Antipina P.V. Some aspects of carbon sequestration capacity of arable soils. *The Journal of Soils and Environment*. 2022. Vol. 5. No. 2. e175. (in Russian). <https://doi.org/10.31251/pos.v5i2.175>

- Arrouays D., McBratney A., Bouma J., Libohova Z., Richer-de-Forges A.C., Morgan C.L.S., Roudier P., Poggio L., Mulder V.L. Impressions of digital soil maps: The good, the not so good, and making them ever better. *Geoderma Regional*. 2020. Vol. 20. e00255. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00255>
- Breiman L. Random forests. *Machine learning*. 2001. Vol. 45. No. 1. P. 5–32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
- Conrad O., Bechtel B., Bock M., Dietrich H., Fischer E., Gerlitz L., Wehberg J., Wichmann V., Böhner J. System for automated geoscientific analyses (SAGA) v. 2.1.4. *Geoscientific model development*. 2015. Vol. 8. No. 7. P. 1991–2007. <https://doi.org/10.5194/gmd-8-1991-2015>
- Cutler D.R., Edwards T.C.Jr., Beard K.H., Cutler A., Hess K.T., Gibson J., Lawler J.J. Random forests for classification in Ecology. *Ecology*. 2007. Vol. 88. No. 1. P. 2783–2792. <https://doi.org/10.1890/07-0539.1>
- Defourny P., Lamarche C., Bontemps S., De Maet T., Van Bogaert E., Moreau I., Brockmann C., Boettcher M., Kirches G., Wevers J., Santoro M., Ramoino F., Arino O. Land Cover Climate Change Initiative – Product User Guide v2. 2017. Issue 2.0. http://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/download/ESACCI-LC-Ph2-PUGv2_2.0.pdf
- Defourny P., Lamarche C., Brockmann C., Boettcher M., Bontemps S., De Maet T., Duveiller G. L., Harper K., Hartley A., Kirches G., Moreau I., Peylin P., Ottlé C., Radoux J., Van Bogaert E., Ramoino F., Albergel C., Arino O. Observed annual global land-use change from 1992 to 2020 three times more dynamic than reported by inventory-based statistics, in preparation, 2023. URL: <https://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/index.php> (accessed on 11.11.2024).
- Duarte E., Zagal E., Barrera J.A., Dube F., Casco F., Hernández A.J. Digital mapping of soil organic carbon stocks in the forest lands of Dominican Republic. *European journal of remote sensing*. 2022. Vol. 55. No. 1. P. 213–231. <https://doi.org/10.1080/22797254.2022.2045226>
- Erunova M.G., Yakubailik O.E. Geomorphometric analysis of agricultural areas based on the FABDEM digital elevation model. *InterCarto. InterGIS*. 2024. Vol. 30. No. 2. P. 252–262. <https://doi.org/10.35595/2414-9179-2024-2-30-252-262>
- FAO. Standard operating procedure for soil organic carbon: Tyurin spectrophotometric method. Rom: FAO, 2021. URL: <https://www.fao.org/3/cb4757en/cb4757en.pdf> (accessed on 11.11.2024).
- FAO and ITPS. Global Soil Organic Carbon Map V1.5: Technical report. Rome, FAO, 2020. P. 169.
- Fick S.E., Hijmans R.J. WorldClim 2: new 1 km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*. 2017. Vol. 37. No. 12. P. 4302–4315. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>
- Gandhi U. JavaScript and the Earth Engine API. In book: *Cloud-Based Remote Sensing with Google Earth Engine* / J.A. Cardille, M.A. Crowley, D. Saah, N.E. Clinton (eds). Cham: Springer, 2023. P. 3–18. https://doi.org/10.1007/978-3-031-26588-4_1
- Gorelick N., Hancher M., Dixon M., Ilyushchenko S., Thau D., Moore R. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote sensing of Environment*. 2017. Vol. 202. P. 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
- Hawker L., Uhe P., Paulo L., Sosa J., Savage J., Sampson C., Neal J. A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed. *Environmental Research Letters*. 2022. Vol. 17. No. 2. P. 024016. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac4d4f>
- Hengl T.A. Practical guide to geostatistical mapping of environmental variables. EC JRC, Ispra (Italy), 2007. 165 p.
- Ignatenko V., Surkov A., Koltcov S. Random forests with parametric entropy-based information gains for classification and regression problems. *PeerJ Computer Science*. 2024. Vol. 10. e1775. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.1775>
- IPCC. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Vol. 4: Agriculture, forestry and other types of land use. Japan: IGES, 2006.
- IUSS. Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. Update 2015. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome, 2015. <https://www.fao.org/3/i3794en/i3794en.pdf>
- Luo C., Zhang X., Meng X., Zhu H., Ni C., Chen M., Liu H. Regional mapping of soil organic matter content using multitemporal synthetic Landsat 8 images in Google Earth Engine. *Catena*. 2022. Vol. 209. P. 105842. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105842>
- Moquedace C.M., Baldi C.G.O., Siqueira R.G., Cardoso I.M., Souza E.F.M., Fontes R.L.F., Francelino M.R., Gomes L.C., Fernandes-Filho E.I. High-resolution mapping of soil carbon stocks in the western Amazon. *Geoderma Regional*. 2024. Vol. 36. e00773. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2024.e00773>
- O'Brien L. Mpspline2: Mass-Preserving Spline Functions for Soil Data. 2022. Available online: <https://CRAN.R-project.org/package=mpspline2> (accessed on 14.12.2024).

Poggio L., de Sousa L., Batjes N., Heuvelink G., Kempen B., Ribeiro E., Rossiter D. SoilGrids 2.0: producing soil information for the globe with quantified spatial uncertainty. *Soil*. 2021. Vol. 7. No. 1. P. 217–240. <https://doi.org/10.5194/soil-7-217-2021>

R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria, 2022. <https://www.R-project.org/>

Rodriguez-Galiano V.F., Ghimire B., Rogan J., Chica-Olmo M., Rigol-Sanchez J.P. An assessment of the effectiveness of a random forest classifier for land-cover classification. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2012. 67. P. 93–104. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2011.11.002>

Singh J., Knapp H.V., Demissie M. Hydrologic modelling of the Iroquois River watershed using HSPF and SWAT. Illinois State Water Survey Contract Report 2004-08. Illinois State Water Survey, Champaign. 2004. <http://www.isws.illinois.edu/pubdoc/CR/ISWSCR2004-08.pdf>

Suleymanov A., Tuktarova I., Belan L., Suleymanov R., Gabbasova I., Araslanova L. Spatial prediction of soil properties using random forest, k-nearest neighbors and cubist approaches in the foothills of the Ural Mountains, Russia. *Modelling Earth System and Environment*. 2023. Vol. 9. No. 3. P. 3461–3471. <https://doi.org/10.1007/s40808-023-01723-4>

Zhang F., Wen N. Carbon price forecasting: a novel deep learning approach. *Environmental Science and Pollution Research*. 2022. Vol. 29. No. 36. P. 54782–54795. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19713-x>

Zhou T., Wenhao L.W., Geng Y., Xiao S., Chen J., Xu X., Pan J., Si B., Lausch A. National-scale spatial prediction of soil organic carbon and total nitrogen using long-term optical and microwave satellite observations in Google Earth Engine. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2023. Vol. 210. P. 107928. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.107928>

Received 12 September 2025

Accepted 14 October 2025

Published 17 October 2025

About the author:

Natalya V. Gopp – Candidate of Biological Sciences, Leading Researcher in the Laboratory of Geography and Soil Genesis in the Institute of Soil Science and Agrochemistry, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); natalia.gopp@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-7549-2984>

The author read and approved the final manuscript



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

Влияние водорода на окислительно-восстановительные свойства и гумус черноземных почв (на примере модельных опытов)

© 2025 Н. И. Суханова ¹, А. В. Кирюшин ¹, Н. В. Ларин ²

¹ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», Ленинские горы, д. 1, стр. 12, г. Москва, 199899, Россия. Email: vogudin@yandex.ru, akiriushin@mail.ru

²ФГБУН Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта РАН, ул. Б. Грузинская, д. 10, стр. 1, г. Москва, 123242, Россия

Цель исследования. На основании данных модельных опытов выявить изменение окислительно-восстановительной обстановки и ряда характеристик гумуса в черноземах под воздействием водородного потока.

Место и время проведения. Проведение модельных опытов осуществляли в лабораторных условиях факультета почвоведения МГУ. В опытах использовали пробы верхних пахотных горизонтов чернозема обыкновенного (Воронежская область) и чернозема выщелоченного (Липецкая область), отобранных на участках исследовательских полигонов вне действия водородного флюида.

Методы. Общее содержание органического углерода определили по методу Тюрина, растворенный органический углерод в почвенном растворе – методом каталитического окисления на ТОС-анализаторе с ИК-детектором, величины окислительно-восстановительного потенциала (ОВП) и pH водной суспензии – потенциометрически. Выделение и очистку препаратов гуминовых кислот (ГК) проводили методом, рекомендованным Международным гуминовым обществом (IHSS). Элементный состав препаратов ГК определили на элементном анализаторе Vario EL III. Измерения содержания элементов в почвенном растворе осуществляли методом ИСП-ОЭС на оптико-эмиссионном спектрометре Agilent 5110 (М-МВИ-80-2008). Определение содержания железа несиликатных соединений проводили в вытяжке Мера-Джексона, железа слабоокристаллизованных соединений в составе несиликатных – в вытяжке Тамма. Спектры ЯМР¹H и ЯМР¹³C гуминовых кислот получены на ЯМР-спектрометре «Bruker AMX-400».

Основные результаты. В серии модельных опытов показано, что в черноземных почвах под воздействием водородного потока резко меняются окислительно-восстановительные условия, интегральным показателем смены которых является снижение величины окислительно-восстановительного потенциала почвы до крайне низких значений; при этом наблюдается некоторое снижение актуальной кислотности. В таких условиях происходит трансформация гумуса. По данным спектров ЯМР ¹³C можно констатировать, что переувлажнение почвы незначительно влияет на фрагментный состав гуминовых кислот чернозема, тогда как поступающий водород обеспечивает деструкцию периферийной части гуминовых молекул без разрушения ароматических кластеров. В условиях модельного опыта в присутствии потока водорода в почве повышается содержание цитраторастворимого и оксалаторстворимого железа, а их соотношение свидетельствует об интенсификации глеевого процесса. Кроме того, усиливаются процессы выноса органического вещества из почвы в почвенный раствор, а возрастание концентрации в нем алюминия говорит о вероятном разрушении кристаллических решеток алюмосиликатов, входящих в состав твердой фазы почвы.

Ключевые слова: глубинный водород; черноземные почвы; гумус; гуминовые кислоты; фульвокислоты; гуминовые препараты; органическое вещество почв; спектры ЯМР¹H и ЯМР¹³C гуминовых кислот почв.

Цитирование: Суханова Н.И., Кирюшин А.В., Ларин Н.В. Влияние водорода на окислительно-восстановительные свойства и гумус черноземных почв (на примере модельных опытов) // Почвы и окружающая среда. 2025. Том 8. № 3. е310. DOI: [10.31251/pos.v8i3.310](https://doi.org/10.31251/pos.v8i3.310)

ВВЕДЕНИЕ

Проведенные ранее исследования показали, что почвы, испытывающие воздействие глубинного водорода в местах его выхода из недр Земли, при прочих равных условиях резко отличаются от почв окружающих территорий (Суханова и др., 2013, 2020; Суханова, Кирюшин, 2022; Sukhanova, Zubkova, 2018). Влияние фактора потока водорода отражается и на морфологическом профиле, и на химическом состоянии почв, а результат воздействия глубинного водорода на почву зависит от ее типовой принадлежности, геологических особенностей территории дегазации, климатических циклов и, наконец, времени контакта поступающего из недр Земли водорода с почвенной массой. В таких условиях почва испытывает не только действие водородного потока

разной интенсивности, но и многих биосферных факторов, таких как цикличное переувлажнение и иссушение, смена теплового и микробиологического режимов и др. Это, несомненно, влияет на взаимодействие почвенных компонентов и водорода. В такой неоднородной и очень сложной системе как почва трудно предсказать, как и с какой интенсивностью будет происходить превращение поступающего из недр молекулярного водорода в активные формы. Поэтому количественно вычленив из результата ансамбля факторов действие водорода – задача крайне сложная, иногда почти нереализуемая, особенно в случаях, когда факторы однонаправленные (Суханова, Кирюшин, 2023). Приблизиться к решению этой задачи возможно путем постановки лабораторных модельных экспериментов, в которых можно отсечь влияние многих мешающих воздействий.

Следует отметить, что исследований влияния молекулярного водорода на почвы ранее практически не было по следующим причинам. Молекулярный водород считался малоактивным газом; для превращения его в активные формы требуется большое количество энергии – 436 кДж/моль. Вместе с тем, исследования геологической науки последних лет обнаружили высокую встречаемость мест выделения больших количеств молекулярного водорода на всех континентах планеты (так называемая холодная дегазация), часто это явление охватывает значительные площади. Однако в этих исследованиях почва не рассматривалась.

Анализ большого количества литературных источников из смежных областей науки говорит о довольно высокой активности молекулярного водорода в различных природных средах и технологиях, где он выступает как восстановитель (Пискарев и др., 2010; Травин, 2018; Еспаев, Альжанов, 2019). Следует полагать, что и в почве, если в нее поступает много водорода, а микробиота не способна его весь утилизировать, он может играть ту же роль и менять почвенную окислительно-восстановительную обстановку. Интегральным показателем, характеризующим ее смену, является величина **окислительно-восстановительного потенциала (ОВП)**. В полевых условиях по известным причинам провести измерения ОВП с необходимой точностью бывает затруднительно. Кроме того, полученные полевые результаты далеко не всегда отражают реальную динамику окислительно-восстановительных процессов в почве. Поэтому мы поставили серию лабораторных модельных опытов, имитирующих различные режимы водородного потока, цель которых – выявить изменение окислительно-восстановительной обстановки и ряда характеристик гумуса в черноземах под воздействием водородного потока.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследования являются пахотные горизонты чернозема выщелоченного территории Кривоборгского и Салтыковского прогиба (Липецкая область) и чернозема обыкновенного территории Хоперского разлома (Воронежская область). Для модельных опытов 1 и 2 использовали фоновые пробы чернозема выщелоченного, отобранные на участках, не подвергающихся воздействию водородного флюида. На территории распространения чернозема обыкновенного почвенные пробы отбирали в западине с потоком глубинного водорода (H_2) и на территории, окружающей западину без выхода H_2 (фоновые). Для модельного опыта 3 использовали фоновые почвы чернозема обыкновенного, отобранные на участках, не подвергающихся воздействию водородного флюида.

Модельные опыты поставлены с учетом факта, что водородный газ обладает высокой скоростью диффузии, особенно в воздухе, и стремится вверх. Поэтому подачу водорода осуществляли снизу. Источник водорода – электролизный генератор ЛБ2.832.01 высокочистого водорода (99,9 об. %) производительностью около 60 мл/мин. В качестве емкостей для опытов использовали делительные воронки.

Модельный опыт 1. Почва – чернозем выщелоченный. Навески почвы по 400 г помещали в литровые стеклянные емкости в трех повторностях, затапливали дистиллированной водой так, чтобы зеркало поверхности воды было выше поверхности почвы примерно на 2 см (точно по 200 мл воды в каждую емкость). Через затопленную почву из генератора снизу пропускаться водород однократно в течение 30 минут; емкости не закрывали. После прекращения обработки водородом измерения величин ОВП проводили через каждые 10 минут в течение 5 часов и далее однократно через 72 часа.

Модельный опыт 2. Почва – чернозем выщелоченный. Навески почвы по 400 г помещали в литровые стеклянные емкости (всего 6 шт.) и затапливали водой (по 200 мл воды в каждую). Три из них – контрольные; в другие три емкости снизу через затопленную почву каждые 3–4 дня пропускаться водород в течение 30 минут, емкости не закрывали. Измерения величин ОВП и pH проводили в емкостях до обработки и сразу после обработки водородом. Опыт проходил в три этапа. Каждый этап длился около 20 дней. После каждого этапа почву оставляли для естественной сушки в

течение месяца. После периода сушки в почву опять добавляли 200 мл воды и через те же емкости пропускали водород (этап 2) в том же режиме. После окончания этапа 2 колбы опять оставляли на сушку в течение месяца, а затем все повторялось (этап 3).

Модельный опыт 3. Почва – чернозем обыкновенный. Навески почвы по 400 г помещали в литровые стеклянные емкости (всего 6 шт.) и затопливали водой. Три из них – контрольные. В следующих трех снизу через затопленную почву из электролизного генератора ежедневно пропускали поток водорода в течение 8 часов, сразу после окончания пропускания емкости закрывали. Длительность эксперимента 4 месяца. В ходе опыта ежедневно контролировали величины ОВП и pH. По окончании опыта простым сливанием отобрали пробы почвенного раствора для определения содержания перешедших в него элементов. Почву извлекали из емкостей и готовили к дальнейшим анализам.

Общее содержание органического углерода в почвах определили по методу Тюрина, растворенный органический углерод в почвенном растворе – методом каталитического окисления на ТОС-анализаторе «Shimadzu» с ИК-детектором; величины окислительно-восстановительного потенциала и pH водной суспензии – потенциометрически. Данные ОВП для простоты представлены в абсолютных значениях ЭДС. Содержание элементов почвенного раствора определили методом ИСП-ОЭС на оптико-эмиссионном спектрометре Agilent 5110 (М-МВИ-80-2008). Определение содержания железа несиликатных соединений проводили в вытяжке Мера-Джексона, железа слабо окристаллизованных соединений в составе несиликатных – в вытяжке Тамма. Выделение и очистку препаратов гуминовых кислот проводили методом, рекомендованным Международным гуминовым обществом (IHSS). Элементный состав выделенных препаратов ГК определили на элементном анализаторе Vario EL III.

Спектры ЯМР ^1H всех препаратов **гуминовых кислот (ГК)** получены на ЯМР-спектрофотометре «Bruker AMX-400» в идентичных количественных условиях регистрации (растворы в D_2O , при $\text{pH} \approx 12$, 600 МГц). Количественные спектры ЯМР ^{13}C получены для растворов ГК с максимально достижимой концентрацией (max 10 % вес.) в D_2O с добавкой NaOH ($\text{pH} = 12$). Условия регистрации спектров – комнатная температура, 150 МГц, импульс 90° 13,7 мксек, $\text{AT} = 0,7$ сек, $\text{RD} = 7$ сек, число проходов 10000 при диаметре ампулы для ЯМР 10 мм. То есть каждый спектр – результат 20-часового накопления информации.

Результаты модельных опытов представлены как среднее арифметическое из трех повторностей.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Модельный опыт 1 был поставлен для того, чтобы понять, как меняется величина ОВП почвы после прекращения 30-минутного пропускания через нее водорода в заданных условиях последующего лабораторного опыта. После добавления воды в почву окислительно-восстановительный потенциал в ней установился +220 мВ. После пропускания потока водорода величина ОВП сразу резко изменилась до крайне низких значений -570 мВ. После прекращения обработки водородом измерения величин ОВП проводили через каждые 10 минут. Данные представлены на рисунке 1.

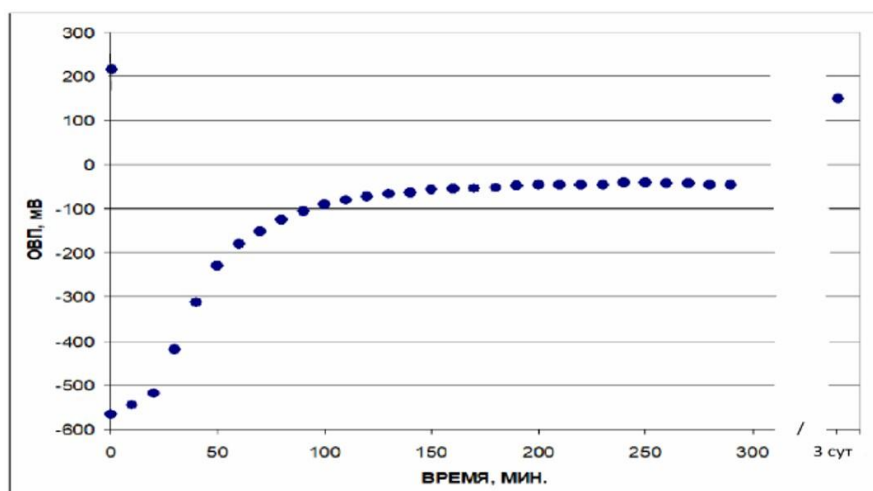


Рисунок 1. Ход изменения значений окислительно-восстановительного потенциала (ОВП) почвы после прекращения обработки ее молекулярным водородом (модельный опыт 1).

Ход изменения величин ОВП в первом опыте показывает, что в течение 1,5–2 часов значения его резко увеличиваются. Причина такого поведения показателя ОВП, вероятно, связана с выходом основного количества газообразного водорода из пространства почвы и поступлением атмосферного воздуха, обогащенного кислородом. Последующее медленное повышение значений, возможно, определяется медленным выходом водорода из почвенных ловушек – мелких пор, нанотрещин и др. Далее в течение 3 суток величина ОВП постепенно приближалась к исходному значению, но все равно оставалась ниже первоначальной. Объяснить последний факт пока затруднительно. Неясно, что происходит (или не происходит) с водородом в теле почвы, как ведут себя окислительно-восстановительные пары в почве и др. Это требует дальнейших специальных исследований.

Модельный опыт 2. В некоторых разломных зонах планеты поток водорода может быть очень интенсивным и при длительном воздействии сопровождается нарушениями кристаллических пород в верхних слоях Земли и выносом материала в осадочных породах, перекрывающих разломные участки (Филиппова, 2023; Prinzhofer et al., 2019). В результате со временем на таких равнинных территориях формируются специфические западины – топографически круговые неглубокие понижения разного размера (Ларин и др., 2010; Суханова и др., 2020; Larin et al., 2015). В отличие от западин, образованных водой без выхода глубинного водорода, они не повторяют особенности рельефа и имеют правильно круглую форму. Данные водородометрии на различных разломных территориях и у разных авторов показывают, что импульсный поток водорода наблюдается в течение всего года, но самые интенсивные выбросы водородного газа происходят в апреле-мае и октябре-ноябре (Сывороткин, 2002, 2013; Перевозчиков, 2012). В это время водородные западины в черноземной зоне, как правило, обводнены. Почвы в таких западинах испытывают совокупное действие двух негативных факторов – пульсирующего потока водорода и временного переувлажнения. Поэтому наш опыт был поставлен по схеме, имитирующей, в первом приближении, режимы, подобные режимам водородных западин с кратковременным импульсным потоком водородного газа через обводненную почву. Водород пропускался каждые 3–4 дня в течение 30 минут, затем емкости закрывались на час. То есть полноценный контакт почвы с водородным газом осуществлялся в течение 1,5 часов. Остальное время до следующего акта обработки емкости были открыты.

Результаты модельного опыта 1 и начального этапа модельного опыта 2 были опубликованы нами ранее (Суханова, Кирюшин, 2024). В дальнейшем опыт 2 был продолжен во времени, данные статистически обработаны и в данной статье приведены в полном виде.

Величины показателей ОВП и pH представлены на рисунках 2–5. Для статистической обработки данных использовали прикладной математический пакет Microsoft Excel 2021, где проведено сравнение выборок методом коробчатой диаграммы и рассчитаны доверительные интервалы средних. Результаты представлены в приложении (рис. 1–6, табл. 1–2).

В контрольных вариантах без потока водорода в течение 18 дней первого этапа происходит закономерное уменьшение значений ОВП, связанное, возможно, с постепенным расходом кислорода в условиях затопления, изменением структуры микробиоты и пр. (рис. 2 А). Здесь и далее на графиках данные представлены как среднее из трех повторностей опыта.

В течение второго этапа (после высушивания и повторного затопления) величины ОВП остаются постоянными, аналогичными значениям окончания первого этапа (рис. 2 Б). После следующего акта высушивания и затопления в течение 3 этапа они возвращаются к значениям начала опыта и остаются практически таковыми до конца (рис. 2 В).

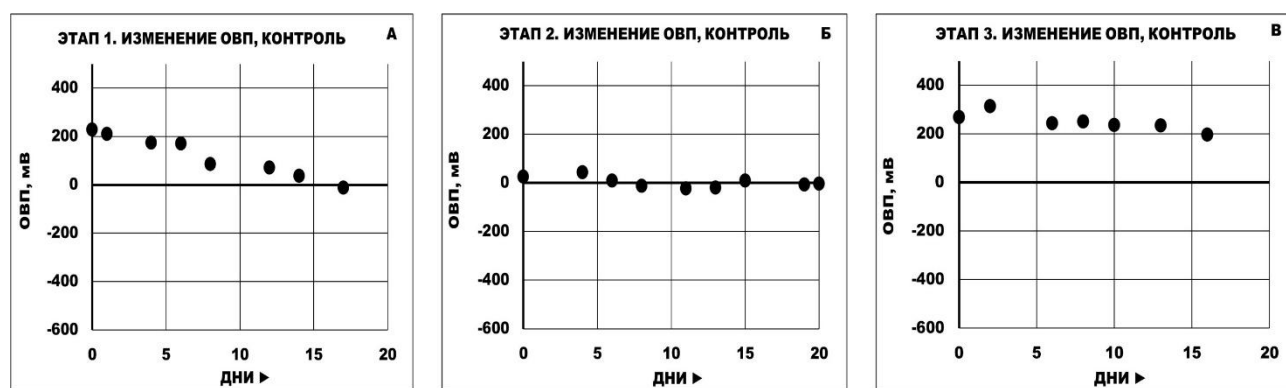


Рисунок 2. Изменение величины ОВП почвы в контрольном варианте (без потока водорода) модельного опыта 2 (А – 1 этап, Б – 2 этап, В – 3 этап).

В вариантах с водородом сразу после начала его пропускания (в ходе первого этапа) окислительно-восстановительный потенциал резко снижается (-500 мВ, на рисунке 3 А показано крестиками), а к следующему акту пропускания через 2–3 дня его величина увеличивается, но не достигает исходных значений (показано треугольниками) начала опыта.

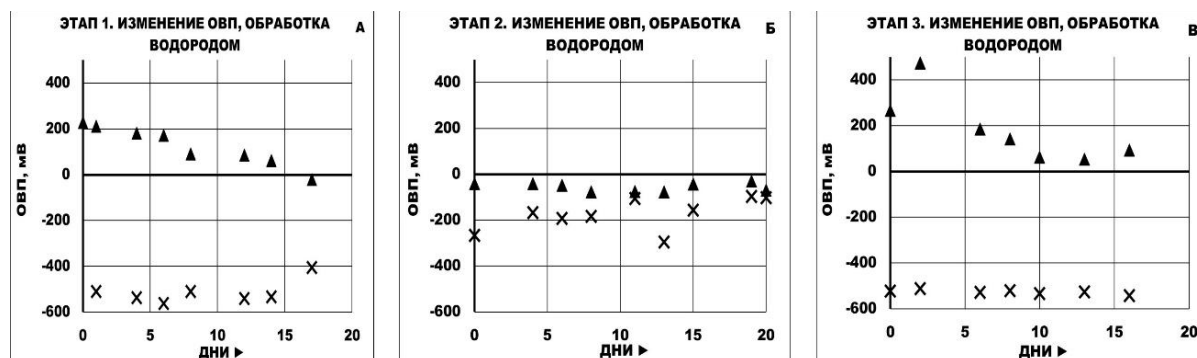


Рисунок 3. Изменение величины ОВП в варианте с пропусканием водорода в модельном опыте 2 (А – 1 этап, Б – 2 этап, В – 3 этап). Крестиками показаны значения, измеренные сразу после обработки водородом, треугольниками – до обработки.

Результат второго этапа варианта с водородом после высушивания и последующего затопления показывает иную картину (рис. 3 Б). После пропускания водорода величина ОВП по сравнению с первым этапом снижается, но незначительно и мало меняется во времени. Кроме того, размах скачков значений ОВП (до пропускания и после пропускания) невелик.

В течение третьего этапа, так же, как и в первом, наблюдается резкое снижение ОВП при пропускании водорода через почву и значительный размах колебаний его значений «до пропускания» и «после пропускания» (рис. 3 В).

В итоге, оценивая ход изменения величины ОВП в вариантах с водородом в течение всех трех этапов опыта, можно отметить, что почва в момент прохождения водорода меняет свой режим на резко восстановительный. Такие низкие значения ОВП в почвах естественных ландшафтов вне территорий водородной дегазации, как правило, не встречаются (Орлов и др., 2005). После прекращения воздействия водорода величина окислительно-восстановительного потенциала постепенно увеличивается, но не всегда достигает предыдущего значения. Это повторяется почти при каждом акте обработки водородом.

При оценке достоверности результатов по конечным точкам измерений в каждом этапе опыта можно уверенно полагать, что водород оставляет некоторый след в почве (приложение: рис. 1–3, табл. 2). Особенно это проявляется в течение второго и третьего этапов.

В то же время, окислительно-восстановительный потенциал почвы в условиях переувлажнения без потока водорода меняется во времени не столь значительно, на 200 мВ за 20 дней в течение первого этапа, и практически не меняется в течение 2 и 3 этапов.

Значения актуальной кислотности (учитывая точность метода измерения) в контрольной почве в течение каждого отдельного этапа практически постоянны, но заметно меняются при смене гидрологического режима (рис. 4 А, Б, В).

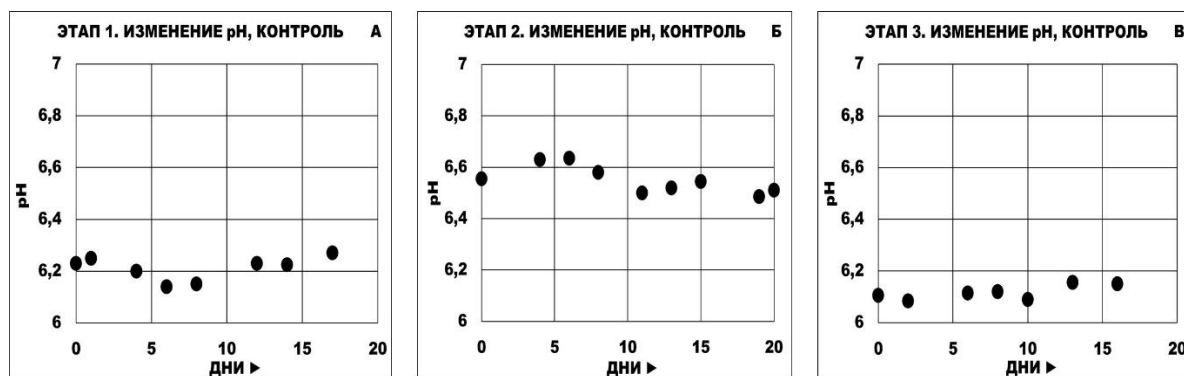


Рисунок 4. Изменение величины pH почвы в контрольном варианте (без потока водорода) модельного опыта 2 (А – 1 этап, Б – 2 этап, В – 3 этап).

В вариантах с током водорода значения величины pH почвы оказываются выше контрольных. Причем это отмечается на протяжении всех трех этапов опыта. Однако размах колебаний величин pH до и после обработки водородом (рис. 5) незначим по сравнению с размахом таковых колебаний величин ОВП. Если сравнивать с контрольными вариантами, обработка водородом стабильно увеличивает величину pH, которая только иногда не возвращается к предыдущему значению (приложение: рис. 4, 5, 6; табл.1, 2).

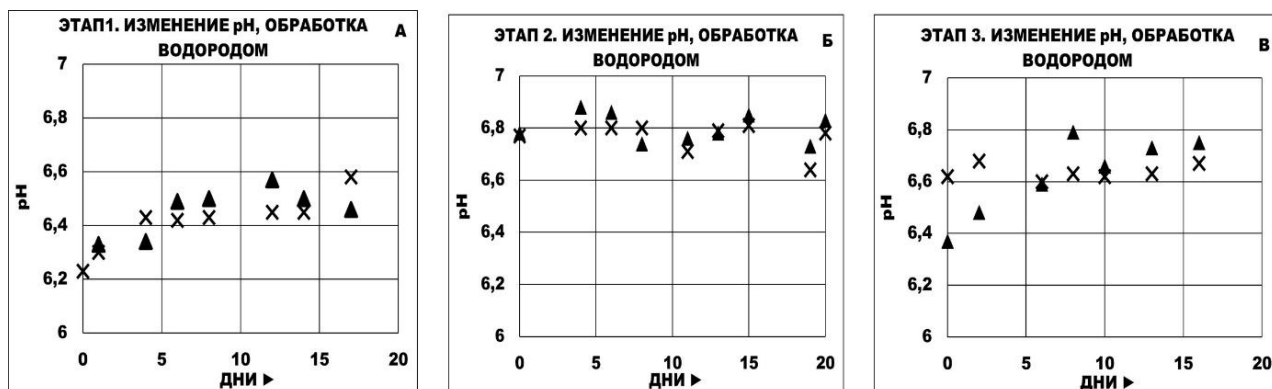


Рисунок 5. Изменение величины pH в варианте с пропуском водорода в модельном опыте 2 (А – 1 этап, Б – 2 этап, В – 3 этап). Крестиками показаны значения, измеренные сразу после обработки водородом, треугольниками – до обработки.

В целом следует отметить большую изменчивость величины показателей ОВП и актуальной кислотности в вариантах с водородом в ходе всех трех этапов. Такая динамичная картина есть результат действия факторов временного избыточного переувлажнения, потока водорода и смены гидрологического режима. В соответствии с геологическими особенностями земной дегазации можно полагать, что такой резко пульсирующий режим показателей изменения окислительно-восстановительных условий наблюдается и в натуральных условиях водородных западин. Резкое снижение ОВП при поступлении больших количеств газообразного водорода в почву свидетельствует о том, что в ее теле появляются активные формы водорода. Механизм такого превращения можно, пока гипотетически, рассматривать, опираясь на многочисленные литературные данные смежных наук.

Водород проходит через все материалы и обладает высокой диффузионной способностью не только в пористых или аморфных, но и в твердых средах с выраженной в той или иной степени кристаллической решеткой, таких как металлы, стекло, минералы, горные породы и др. (Водород в металлах, 1981; Левшунова, 1982, 1994; Комаров, 1990; Кашлев, 2005; Яницкий, 2005). В кристаллической решетке твердых тел основной механизм диффузии водорода междоузельный. Модель этого процесса в упрощенном виде можно представить следующим образом. Молекула водорода на поверхности диссоциирует, атомарный водород преодолевает энергетический барьер и диффундирует в объем металла, теряет единственный электрон и существует в виде протона с исключительно высокой подвижностью в кристаллической решетке. Поведение водорода зависит не только от внешних факторов, но и от состояния решетки. В случае объемных дефектов решетки, например наличия нанотрещины, протон входя в ее пространство либо молизуется (тогда в результате в трещине может накапливаться водородный газ), либо может с чем-то прореагировать. Объединение протона в молекулу в дефектах кристаллической решетки может создавать давление, приводя к охрупчиванию и разрушению материала. Геологи неоднократно указывали на изменение физических свойств и даже на необычное разрушение горных пород (гранитов, гранитогайсов) там, где наблюдаются потоки водорода. В результате низкоэнергетического воздействия в твердом скелете минералов образуются поля напряжений, структурные перестройки, текстуры деформаций, развивается общая пористость. В лабораторных экспериментах при имплантации водорода (оливин, пироксен, кварцит и др.) показано формирование дополнительной пористости различного радиуса с высоким внутренним давлением газа, приводящим к образованию трещин вокруг пор (Гуфельд и др., 1998; Заводинский и др., 2004; Гниденко, 2005; Гуфельд, 2007, 2012). В работе Левшуновой (1982) на модельных опытах показано активное вхождение водорода в структуру карбонатных минералов, в результате чего менялись их механические свойства, такие как прочность и др.

Хорошо известны превращения молекулярного водорода при встрече с живой составляющей почвы. Водород – это ценный строительный элемент для микробиоты, поэтому природа сформировала систему ферментов для перевода молекулярного водорода в активную и доступную для потребления форму. Недавние исследования упорядочили и классифицировали несколько тысяч гидрогеназ (Greening et al., 2016; Liu et al., 2023). Они были извлечены из всех типов субстратов окружающей среды. Некоторые ученые полагают, что при потреблении активного водорода микробиотой возможны потери, не исключая его кратковременного присутствия вблизи бактериальной клетки (Канивец, 1970).

Кроме того, экспериментально показано, что при насыщении очищенной воды водородом меняется ее окислительно-восстановительный потенциал до крайне низких значений (-500 – -700 мВ); вода при этом приобретает иные свойства. Этот процесс не быстрый, такой потенциал устанавливается только через сутки при непрерывном контакте водорода и воды, при этом величина pH не меняется (Пискарев и др., 2010). На основании кластерной модели структуры воды, предложенной Я.И. Френкелем (1975), полагают, что в кластерах за счёт кооперативных взаимодействий между водородными связями может происходить миграция протона по эстафетному механизму, приводящая к делокализации его в пределах кластера. То есть система «чистая вода – водород» с течением времени приобретает восстановительные свойства. Проще говоря, в такой системе возникают свободно мигрирующие протоны и электроны. Конечно, это в чистой воде. Для растворов, особенно таких сложных как почвенные, картина на порядок сложнее, но все-таки и в них нельзя исключать трансформацию молекулярного водорода в активные формы.

Таким образом, на основании обширных научных данных о поведении молекулярного водорода в разных средах, полученных в последнее время, можно отметить, что молекулярный водород в многокомпонентной, многофазной и динамичной почвенной среде может под воздействием различных факторов менять свою активность от инертной молекулы до очень активных атома и протона. Протон способен проходить через кристаллические решетки, например, минералов в любых условиях. Выходя из решетки на поверхность, через несколько десятых долей секунды протоны объединяются в молекулу. Если на пути водорода в момент выделения окажется подходящая молекула другого вещества, то даже долей секунды достаточно, чтобы прореагировать с ней. Не исключено, что аналогичный процесс может происходить при превращении молекулярного водорода в его активные формы посредством внекорневой гидрогеназы – либо он утилизируется микробной клеткой, либо молизуется, либо с чем-то вступает в химическую связь.

Кроме того, известно, что районы дегазации – это районы с повышенной сейсмичностью и с тектоническими нарушениями. На этих территориях повышен радиоактивный фон, наблюдаются аномальные изменения гравитационного и электромагнитного полей. Многолетнее изучение зон глубинных разломов показало, что в этих условиях некоторые из них являются генераторами вихревых потоков ионизированных частиц и низкочастотного электромагнитного излучения, проникающих из недр Земли высоко в атмосферу и регистрируемых со спутников (Сергеева и др., 2004; Экология человека ..., 2006; Лосева и др., 2009; Кутинов, Чистова, 2012). В этих условиях нельзя исключать появление активных форм водорода и в почве. Таким образом, можно полагать, что водород в условиях его избыточного потока из разломных зон Земли, превращаясь в активные формы в многокомпонентной почвенной среде, выступает как сильный восстановитель, в результате свойства почвы могут значимо меняться. По мнению И.С. Кауричева и Д.С. Орлова (1982) контрастное проявление окислительно-восстановительных процессов в почвах приводит к возникновению совокупности явлений, отражающих основу глеевого процесса. Это формирование специфического состава органического вещества, разрушение устойчивых соединений минеральной части почвы, образование водорастворимых органоминеральных соединений и их миграции по почвенному профилю. Восстановительные процессы способствуют замедленному превращению растительных остатков, образованию наиболее подвижных и активных форм органического вещества. В почве могут накапливаться, кроме так называемых фульвокислот, низкомолекулярные органические кислоты, полифенолы и их производные с повышенной миграционной способностью. При длительном накоплении таких веществ в теле почвы величина показателя pH почвы в результате резко снижается. Кроме того, постоянное поступление в почву органических веществ с кислотными свойствами может приводить к трансформации соединений Fe, Al, Mn из устойчивых труднорастворимых форм в более мобильные (Кауричев, Орлов, 1982).

Модельный опыт 3 был поставлен с целью оценки влияния длительного потока водорода на органическое вещество почв. Почвенный гумус, как известно, энергетически достаточно устойчивое соединение, а водородный газ быстро мигрирует от места своего появления. Кратковременный

контакт потока водорода с почвой может не показать видимого нашими методами результата. Поэтому опыт поставлен так, чтобы почва в сосудах практически постоянно контактировала с водородом. Чтобы обеспечить такие условия, водород пропусклся каждый день в течение 8 часов, а затем колбы на ночь закрывались стеклянной пробкой. В контрольном варианте без водорода через сутки после начала опыта наблюдалось снижение значений окислительно-восстановительного потенциала на 100, а в варианте с пропуском водорода на 800 мВ. Конечно, его содержание в сосуде в течение суток сохранить постоянным не представляется возможным, какая-то его часть со временем теряется. Однако почва в течение всего опыта находилась в среде с повышенной концентрацией газообразного водорода, поэтому значение показателя ОВП почв оставались таковыми с незначимыми колебаниями (± 30 мВ) в течение всего периода опыта, при этом значения pH постепенно увеличивались от 5,64 в начале и до 6,15 в конце опыта.

После окончания эксперимента из проб почв модельного эксперимента были выделены препараты ГК по стандартной методике (III – обработка водородом и IV – контроль) и препараты ГК из почв, сформированных в водородной западине (II), и на территории, окружающей западину без водорода (I – фон). Во всех препаратах гуминовых кислот определена зольность и элементный состав (табл. 1).

Таблица 1

Элементный состав препаратов гуминовых кислот (ГК) исследованных почв

Проба*	Зольность	Содержание на сухое беззольное вещество															
		Массовая доля, %				Атомные проценты				Атомные отношения			Степень окисления	Ароматичность	C _{ал}	C _{ар}	
		C	H	O	N	C	H	O	N	H:C	O:C	C:N					
Нативные условия																	
II	1,35	53,0	4,3	39,6	3,2	38,9	37,2	21,8	2,0	0,96	0,56	19,5	0,17	68,2	0,82	38,1	
I	1,27	54,2	3,9	37,4	4,5	40,7	35,3	21,1	2,9	0,87	0,52	14,0	0,17	68,1	0,73	40,0	
Модельный опыт 3																	
IV	3,28	53,5	3,6	39,6	3,4	41,6	33,1	23,1	2,2	0,79	0,56	18,9	0,32	72,4	0,72	40,9	
III	1,52	54,4	3,5	39,4	2,7	42,6	32,5	23,1	1,8	0,76	0,54	23,7	0,32	74,3	0,69	41,0	

Примечание.

* Почвенные пробы, отобранные в нативных (I – западина с потоком водорода (H₂), II – фон без выхода H₂) и модельных (III – с пропуском H₂, IV – контроль без потока H₂) условиях.

На основании результатов элементного состава показано, что в условиях модельного опыта в составе гуминовых кислот черноземных почв, подвергающихся влиянию водорода, происходят следующие изменения: обуглероживание, снижение отношения Н:С. Это указывает на уменьшение доли алифатических цепочек в ГК, и, в результате, увеличение степени ее ароматичности (табл. 1). То есть в условиях водородного флюида в почвах, вероятно, происходит трансформация гумуса путем отщепления алифатических фрагментов ГК. Те же закономерности наблюдаются и в естественных условиях пары «фон – западина». Гуминовые кислоты в пробах, отобранных в водородной западине, по сравнению с ГК почв окружающей территории, более обуглерожены и степень ароматичности в них выше. В естественных условиях по сравнению с модельным опытом эти различия проявляются ярче, т.е. водород усиливает действие фактора переувлажнения. Не вдаваясь глубоко в сложнейшие биохимические механизмы почвенных процессов, можно полагать, что действие фактора переувлажнения реализуется в результате постепенной убыли кислорода из почвенной массы, а действие водородного фактора за счет поступления в тело почвы сильного восстановителя.

Для подтверждения этого результата была осуществлена регистрация количественных спектров ¹H ЯМР и ¹³C ЯМР тех же четырех препаратов ГК почв, отобранных в нативных (западина I и фон II) и модельных (с насыщением водородом III и без водорода IV) условиях. Поскольку предполагается, что образец ГК из почвы западины в нативных условиях (I) подвергался влиянию водорода, выходящего из недр Земли, то его отличия от фонового нативного образца (II) должны быть аналогичны отличиям образца, обработанного водородом (III), от контрольного (IV) в модельном опыте.

На рисунках 6 и 7 представлены спектры ЯМР ¹H всех препаратов ГК, полученные в идентичных количественных условиях регистрации спектров.

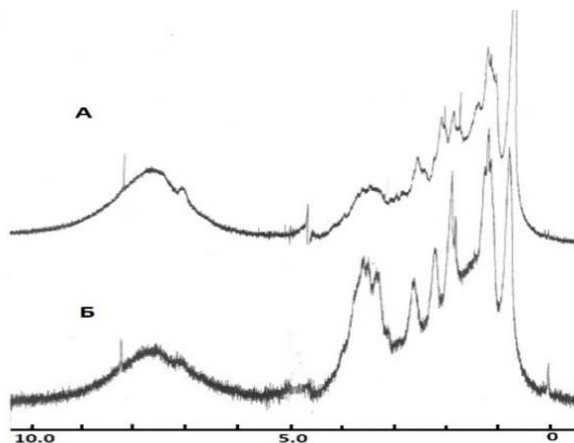


Рисунок 6. ^1H ЯМР спектры гуминовых кислот (ГК) чернозема обыкновенного в нативных условиях (А – западина с потоком водорода, Б – фон без выхода водорода).

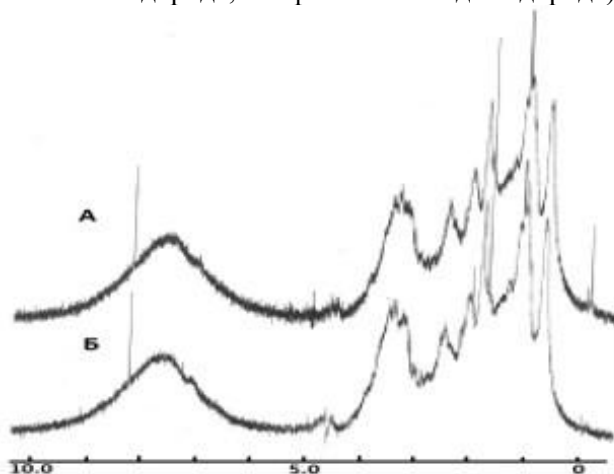


Рисунок 7. ^1H ЯМР спектры ГК чернозема обыкновенного в модельном опыте 3 (А – с пропусканием водорода, Б – контроль без потока водорода).

Качественные их отличия состоят в следующем. В высокочастотной области спектра ГК нативных почв западины (I) и фона (II) присутствует слабый сигнал в области 8,36 м.д., интенсивность которого одинаково резко возрастает в спектрах ГК проб модельного опыта (III, IV). Причины увеличения интенсивности сигнала в этой области относятся к спорным вопросам (Степанов и др., 1997). В нашем случае это можно отнести, вероятно, к результату длительного непрерывного пребывания проб в условиях переувлажнения в модельном опыте в отличие от нативных условий. В спектре ГК почвы из водородной западины (I) сигнал CH_3 -групп в γ -положении линейной цепи относительно любого фрагмента, иного чем CH_2 , в области спектра около 0,9 м.д. имеет наибольшую пиковую интенсивность, тогда как в спектре ГК из остальных образцов почв (II–IV) наиболее интенсивен сигнал CH_2 -групп алифатических цепей. Кроме того, в спектре ГК почвы из водородной западины (I) в отличие от ГК из остальных образцов почв (II–IV) менее выражен сигнал алифатических протонов CH -, CH_2 -, CH_3 -групп в α -положении к атому кислорода в области 3,0–4,2 м.д. Следует заметить, что 4 отдельных сигнала в области 1,2–2,5 м.д. в образце фоновой нативной почвы (II), а также и проб почв модельного опыта (III, IV) имеют более четкую структуру, чем в I. Все эти факты свидетельствуют о большем разнообразии фрагментного состава протонсодержащих групп в ГК почвы водородной западины (I) в нативных условиях относительно всех остальных образцов.

Результаты количественного анализа спектров ЯМР ^1H представлены в таблице 2, в которой даны **интегральные интенсивности (ИИ)**, характеризующие относительное содержание атомов водорода в ароматических фрагментах C_6H (6–10 м.д.), алифатических OSalkHn ($\approx 3,0$ –4,5 м.д.), алифатических групп SalkH ($\approx 0,8$ –3 м.д.) и групп γ - CH_3 длинных алкильных цепей ($< 1,0$ м.д.). Следует отметить, что деление спектра на области осуществлялось не по фиксированным значениям химических сдвигов ^1H , а по минимумам между отдельными сигналами в достаточно плавной огибающей спектра.

Таблица 2

Содержание различных молекулярных фрагментов гуминовых кислот из интегральных интенсивностей сигналов в их спектрах ЯМР ^1H

Образец	Содержание фрагментов, %			
	СарН	ОСалкН	СалкН	CH ₃
Модельный опыт 3				
IV (контроль без H ₂)	25,7	20,2	45,4	8,7
III (с пропуском H ₂)	27,6	22,7	43,8	5,9
Нативные условия				
II (фон без выхода H ₂)	21,7	22,3	48,2	7,8
I (западина с потоком H ₂)	28,2	11,8	48,3	11,7

Наиболее ярко отличается образец ГК почвы водородной западины (I) от остальных тем, что в нем существенно (на 10% и более) понижено содержание групп ОСалкН и повышено (на 3% и более) содержание групп CH₃.

Полученные данные говорят о том, что при сравнении пар образцов ГК «обработка водородом–контроль» в модельном опыте и в нативных условиях наблюдается общая закономерность – увеличение степени ароматичности на 1,9 и 6,5%, соответственно. Для отдельных алифатических фрагментов эффекты разнонаправленные или несущественные.

Поскольку представленная количественная информация из спектров ЯМР ^1H за исключением содержания фрагментов СарН может иметь весьма значительные погрешности (до 3%), обусловленные сильным перекрыванием сигналов протонов алифатических фрагментов, была осуществлена регистрация количественных ЯМР ^{13}C спектров этих же препаратов ГК (рис. 8–11).

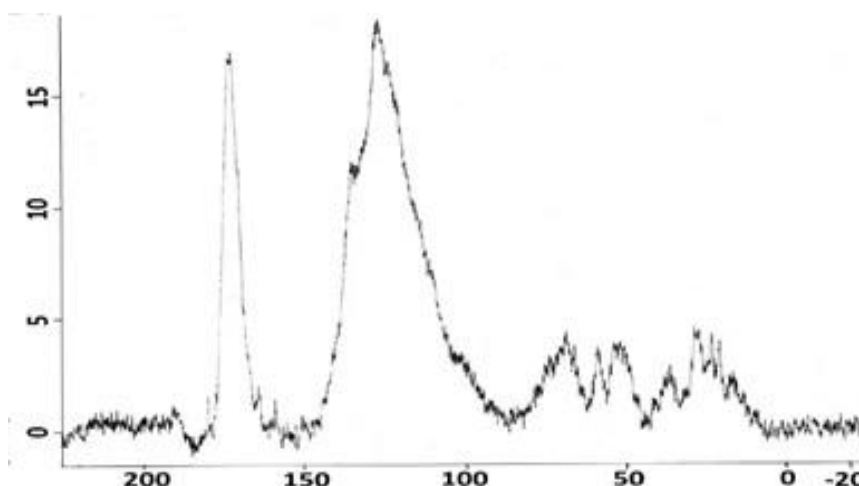


Рисунок 8. ^{13}C ЯМР спектры ГК чернозема обыкновенного в нативных условиях западины с потоком водорода.

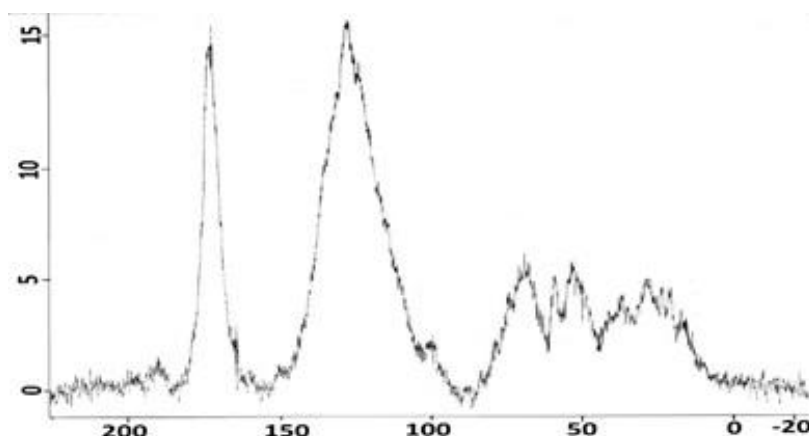


Рисунок 9. ^{13}C ЯМР спектры ГК чернозема КА обыкновенного в нативных условиях без выхода водорода (фон).

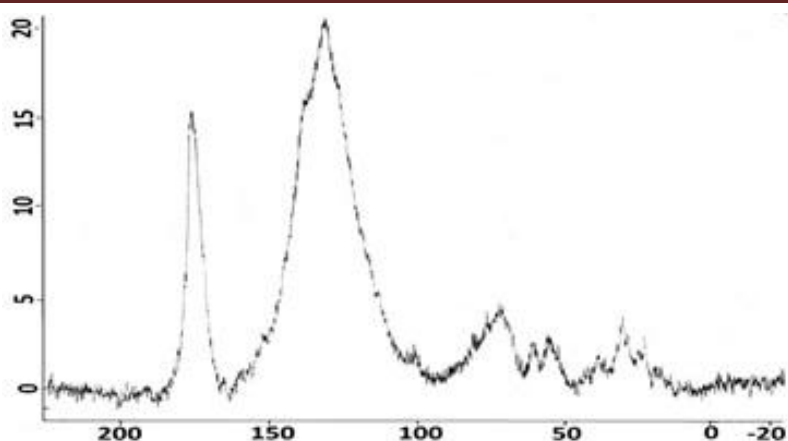


Рисунок 10. ^{13}C ЯМР спектры ГК чернозема обыкновенного в модельном опыте 3 с пропуском водорода.

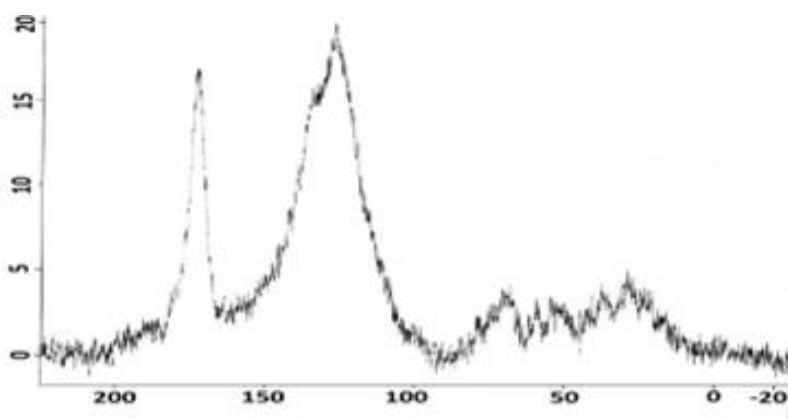


Рисунок 11. ^{13}C ЯМР спектры ГК чернозема обыкновенного в модельном опыте 3 без потока водорода (контроль).

В отличие от спектров ЯМР ^1H в спектре ЯМР ^{13}C можно выделить 4 иных области спектра: область выше ≈ 160 м.д. – фрагменты $\text{C}=\text{O}$ с различным замещением; 90–160 м.д. – атомы углерода ароматических/гетероароматических циклов (Сар), а также в меньшей степени углеродные атомы фрагментов типа $\text{O}-\text{CH}_n-\text{O}$; 50–90 м.д. – атомы углерода алкокси-фрагментов, т.е. ОСалк; < 50 м.д. – атомы углерода всех иных алифатических атомов углерода (Салк).

Качественное сопоставление спектров I–IV не выявляет каких-либо значительных их отличий. Количественное сопоставление интегральных интенсивностей, как и в случае ЯМР ^1H , осуществлялось путем деления спектра на вышеперечисленные поддиапазоны по минимумам спектральной плотности сигналов. Значения ИИ отдельных групп сигналов представлены в таблице 3.

Обработка почвы водородом в модельном опыте приводит к небольшому увеличению (на 2 %) содержания фрагментов ($\text{C}=\text{O}$), увеличению (на 11 %) углерода ароматических/гетероароматических циклов (Сар). При этом уменьшается содержание углерода алкокси-фрагментов (ОСалк) и иных алифатических атомов углерода (Салк) на 6 и 7 % соответственно.

Таблица 3

Содержание различных молекулярных фрагментов гуминовых кислот из интегральных интенсивностей сигналов в их спектрах ЯМР ^{13}C .

Образец	Содержание фрагментов, %			
	$\text{C}=\text{O}$	Сар	ОСалк	Салк
Модельный опыт 3				
IV (контроль без H_2)	15	52	19	14
III (с пропуском H_2)	17	63	13	7
Нативные условия				
II (фон без выхода H_2)	14	48	22	16
I (западина с потоком H_2)	19	63	9	9

При сопоставлении пар образцов ГК «контроль → обработка водородом» в модельном опыте (IV→III) и в нативных условиях (II → I) характер изменений демонстрирует синхронность с той разницей, что в естественных условиях эти изменения более значимые. Это объясняется тем, что почва в водородной западине испытывает хоть и импульсные воздействия потоков водорода, но долгие годы, достаточные для накопления в ней соответствующих изменений, а в модельном опыте контакт водородного газа практически постоянен, но время проведения опыта всего четыре месяца.

Таким образом, наблюдаемые изменения в спектрах ЯМР ^1H и ^{13}C согласуются в предположении о том, что при воздействии водорода на рассматриваемые гуминовые вещества происходит разрушение периферии их ароматических кластеров, что отражается как в росте значений Саp, так и уменьшении значения ОСалк и Салк. Это отнюдь не значит, что ароматических атомов углерода стало больше. Стало больше их относительное содержание.

Обращает на себя внимание рост Саp на 10 % и более при возрастании содержания СаpН всего на 6 % и менее (табл. 2, табл. 3). Возможно, при разрушении периферийной части гуминовых молекул образуются новые связи Саp-Саp или Саp-Салк, т.е. относительное содержание протонов в ароматических и алифатических структурах более сбалансировано. Этому не противоречат несущественные или разнонаправленные изменения содержания протонов в молекулярных фрагментах ОСалкН, СалкН и CH_3 в парах II → I и IV → III.

Не касаясь типов химических превращений и основываясь на количественной информации из спектров ЯМР ^{13}C можно констатировать, что переувлажнение фонового образца ГК (II) незначительно влияет на его фрагментный состав (в пределах ошибки измерений), тогда как воздействие водорода вызывает рост ароматичности на 10% и более. Поступающий водород не может вести к образованию новых ароматических структур, но обеспечивает деструкцию периферийной части гуминовых молекул без разрушения ароматических кластеров.

Если для наглядности представить данные по соотношению алифатических и ароматических фрагментов в препаратах ГК исследованных почв в более кратком виде, то становится очевидным, что оба фактора «переувлажнение» и «поток водорода» действуют в одном направлении в части установления восстановительных условий в почве, и, как следствие, в части итоговых результатов этих действий (табл. 4).

Таблица 4

Соотношение алифатических и ароматических фрагментов в препаратах гуминовых кислот исследованных почв, %

Образец	Объект	Сал	Саp
По данным элементного состава ГК			
I	Фоновая проба чернозема обыкновенного (вне западины). Почва не испытывала временного избыточного переувлажнения	0,82	38,1
V	Контрольная проба (та же фоновая) в ходе модельного эксперимента 3, находилась в условиях переувлажнения без потока водорода	0,72	40,9
II	Та же фоновая, но в ходе модельного эксперимента находилась в условиях переувлажнения и под воздействием потока водорода	0,69	41,9
По данным спектров ЯМР ^{13}C			
I	Фоновая проба чернозема обыкновенного (вне западины). Почва не испытывала временного избыточного переувлажнения	38	48
V	Контрольная проба (та же фоновая) в ходе модельного эксперимента 3, находилась в условиях переувлажнения без потока водорода	33	52
II	Та же фоновая, но в ходе модельного эксперимента 3 находилась в условиях переувлажнения и под воздействием потока водорода	20	63

По данным элементного состава в условиях модельного опыта переувлажнение почвы приводит к увеличению ароматических фрагментов препаратов ГК от 38,1 до 40,9%, а при действии дополнительного фактора водорода от 38,1 до 41,9%. В то же время содержание углерода алифатической части ГК в этом ряду снижается. Такие же, но количественно более проявленные закономерности наблюдаются и при анализе данных спектров ЯМР ^{13}C (табл. 4).

Полученные данные свидетельствуют о том, что при интенсивном потоке молекулярного водорода из недр Земли возможно деструктивное гидрирование органического вещества почв. Можно предположить, что это осуществляется за счет расщепления двойных углерод-углеродных связей подобно механизмам технологий переработки угля, сланцев, нефти, древесины в жидкое

топливо в токе молекулярного водорода (Лозовой, Дьякова, 1940; Малолетнев, Шпирт, 2008; Поляков, Андриевская, 2017; Барышников и др., 2019). Конечно, переработка органического сырья осуществляется в жестких условиях при повышенной температуре и давлении в присутствии катализаторов (металлов переменной валентности и их оксидов) быстро и с достаточной полнотой. В нашем же случае может работать фактор времени, солнечная радиация, роль которой в этом аспекте недооценена, и др. Механизм такого процесса, скорее всего, очень сложен, кроме того, может быть и не один.

Полученные данные модельных опытов и проведенные ранее нами исследования черноземных почв водородных западин в нативных условиях позволяют полагать, что в них осуществляется превращение стабильных гуминовых веществ в более подвижные и агрессивные низкомолекулярные фрагменты, действие которых, вероятно, может приводить к подкислению почв черноземного ряда (Суханова и др., 2020).

В условиях модельного опыта в вариантах с переувлажнением без водорода наблюдается некоторое повышение содержания цитраторастворимого (вытяжка по Мера-Джексона, $Fe_{цит}$) и оксалаторстворимого железа (вытяжка по Тамму, $Fe_{окс}$) на 0,06–0,07 %, а при добавлении в систему фактора водорода их содержание становится еще больше на 0,09–0,14 %, соответственно (табл. 5).

Таблица 5

Содержание цитрато- и оксалаторстворимого железа в почвенных пробах модельного опыта 3 и в нативных условиях, % от почвы

Проба	$Fe_{цит}$	$Fe_{окс}$	$Fe_{окс}/Fe_{цит}$
Фоновая проба чернозема обыкновенного (вне западины). Почва не испытывала временного избыточного переувлажнения	0,47	0,08	0,17
Модельный опыт 3			
Контрольная проба (та же фоновая) в ходе модельного эксперимента, находилась в условиях переувлажнения без потока водорода	0,54	0,14	0,26
Та же фоновая, но в ходе модельного эксперимента находилась в условиях переувлажнения и под воздействием потока водорода	0,56	0,22	0,39
Нативные условия			
Почва западины с потоком водорода	0,95	0,58	0,61

Соотношение цитрато- и оксалаторстворимого железа в присутствии водорода свидетельствует о нарастании в почвах процессов гидроморфизма, т.е. можно полагать, что поток водорода из недр усиливает не только вынос железа из твердой фазы почв, но и, возможно, процессы выноса железа из почвенного профиля, что говорит об интенсификации глеевого процесса.

В пробах почвенного раствора в модельном опыте 3 проведено определение органического углерода и содержание некоторых элементов (табл. 6).

Таблица 6

Содержание элементов в почвенном растворе в ходе модельного опыта 3, мг/л

Элемент	H_2O	H_2O+H_2
Na	13,450	9,940
Mg	21,160	7,880
Al	0,0851	2,460
K	1,310	1,350
Ca	35,280	37,900
Cr	0,114	0,005
Mn	0,054	0,033
Fe	3,050	2,030
Ni	0,015	0,027
Cu	0,007	0,035
Zn	0,025	0,023
As	0,015	0,033
Sr	0,462	0,206
Ba	0,055	0,029

По окончании опыта почвенный раствор переувлажненной почвы без водорода содержал органического углерода 0,03 мг/л, в то время как вариант переувлажненной почвы с водородом 0,07

мг/л. Можно полагать, что в условиях водородной дегазации усиливаются процессы выноса органического вещества из тела почвы. Это находит свое отражение в особенностях морфологического профиля почв водородных западин, где фиксируются гумусовые кутаны, псевдофибры и часто интенсивные нисходящие гумусовые потеки (Суханова и др., 2013).

Из анализа полученных данных видно, что элементы в разных условиях модельного опыта ведут себя по-разному. Обращает на себя внимание повышенный в условиях водородного потока выход в почвенный раствор алюминия (2,460 против 0,085 мг/л). Возрастание концентрации алюминия в жидкой фазе практически на два порядка говорит о вероятном разрушении кристаллических решеток алюмосиликатов, входящих в состав твердой фазы почвы. Увеличивается также растворимость следующих элементов: Ca, Ni, Cu, As. В то же время в условиях водородного потока в почвенном растворе снижаются концентрации элементов: Na, Mg, Cr, Mn, Fe, Sr, Ba. Содержание в жидкой фазе K и Zn при воздействии водорода в условиях модельного опыта практически не меняется. Объяснить такое разное поведение элементов в условиях переувлажнения с водородным потоком и в условиях только переувлажнения на данном этапе нет возможности, хотя это показатель глубоких изменений в почве, ее минеральной матрице. Это выходит за рамки настоящей работы и требует более обширных исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В серии модельных опытов по влиянию потока водорода на черноземные почвы показано, что:

- кратковременное 30-минутное воздействие водородного потока в открытом объеме почвы снижает ее окислительно-восстановительный потенциал до -650 мВ. После прекращения воздействия водорода в течение двух часов значения потенциала резко повышаются до -100 мВ. Затем в течение опыта наблюдается постепенное возрастание величины ОВП почвы. Однако за 72 часа величина ОВП не достигает своего первоначального значения;

- в условиях переувлажнения без воздействия водорода величины окислительно-восстановительного потенциала почвы постепенно немного снижались от +200 до 0 мВ, а в условиях переувлажнения с кратковременным импульсным потоком водорода наблюдалось импульсное снижение ОВП до крайне низких величин (-600 мВ). По окончании воздействия водорода ОВП стремился к предыдущим значениям, но далеко не всегда их достигал;

- в условиях модельного опыта кратковременный поток водорода приводит к увеличению значений pH;

- большое влияние на величины ОВП и pH почвы оказывает смена гидрологического режима как в условиях только переувлажнения, так и в условиях переувлажнения с током водорода;

- на основании элементного состава гуминовых кислот показано, что в условиях модельного опыта в составе ГК почвенных проб, подвергающихся длительному влиянию водорода, происходит обуглероживание и снижение отношения Н:С, что указывает на уменьшение доли алифатических цепочек в ГК;

- основываясь на количественной информации из спектров ЯМР ^{13}C , можно констатировать, что переувлажнение незначительно влияет на фрагментный состав ГК почв (в пределах ошибки измерений), тогда как воздействие водорода вызывает рост ароматичности на 10 % и более. Поступающий водород обеспечивает деструкцию периферийной части гуминовых молекул без разрушения ароматических кластеров;

- оба фактора «переувлажнение» и «поток водорода» действуют в одном направлении и в части установления восстановительных условий в почве, и, как следствие, в части итоговых результатов этих действий;

- в присутствии потока водорода усиливаются процессы выноса органического углерода из тела почвы, повышается содержание цитраторастворимого и оксалаторстворимого железа, а их соотношение свидетельствует об интенсификации глеевого процесса;

- в присутствии потока водорода наблюдается возрастание концентрации алюминия в жидкой фазе, что говорит о вероятном разрушении кристаллических решеток алюмосиликатов, входящих в состав твердой фазы почвы.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках госбюджетной темы МГУ имени М.В. Ломоносова, № госзадания 121040800154-8.

ЛИТЕРАТУРА

- Барышников С.В., Мирошникова А.В., Казаченко Ю.С., Маляр А.Н., Таран О.П., Лавренев А.В., Дьякович Л., Кузнецов Б.Н. Гидрирование древесины и этанолигнина пихты водородом в среде сверхкритического этанола в присутствии бифункционального катализатора Pt/ZrO₂ // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Химия. 2019. Том 12. № 4. С. 550–561. <https://doi.org/10.17516/1998-2836-0150>
- Водород в металлах. Под ред. Г. Алефельда, И. Фёлькиля. Москва: Мир, 1981. Том 2. 480 с.
- Гниденко А.А. Исследование влияния давления на поведение гелия и водорода в кристаллическом кремнии. Автореферат диссертации ... канд. физ.-мат. наук. Хабаровск, 2005. 98 с.
- Гуфельд И.Л. Сейсмический процесс. Физико-химические аспекты. Королев: ЦНИИМаш, 2007. 160 с.
- Гуфельд И.Л. Геологические следствия аморфизации структуры литосферы и верхней мантии, вызванные водородной дегазацией // Геодинамика и тектонофизика. 2012. Том 3. № 4. С. 417–435. <https://doi.org/10.5800/GT-2012-3-4-0083>
- Гуфельд И.Л., Гусев Г.А., Матвеева М.И. Метастабильность литосферы как проявление восходящей диффузии легких газов // Доклады Академии наук. 1998. Том 362. № 5. С. 677–680.
- Заводинский В.Г., Гниденко А.А., Мисюк А., Бак-Мисюк Я. Влияние давления и водорода на образование вакансий и дивакансий в кристаллическом кремнии // Физика и химия полупроводников. 2004. Том 38. № 11. С. 1281–1284.
- Еспаев Н.Е., Альжанов М.К. Использование альтернативных восстановителей при производстве черных металлов // Металлургия XXI столетия глазами молодых: сборник материалов V Международной научно-практической конференции молодых ученых и студентов (Донецк, 22 мая 2019 г.). Донецк: ДОННТУ, 2019. С. 361–362.
- Канивец В.И. Взаимодействие водорода, метана и сероводорода с минеральной частью почвы // Почвоведение. 1970. № 5. С. 52–59.
- Кауричев И.С., Орлов Д.С. Окислительно-восстановительные процессы и их роль в генезисе и плодородии почв. Москва: Колос, 1982. 247 с.
- Кашлев Ю.А. Три режима диффузионной миграции атомов водорода в металлах // Теоретическая и математическая физика. 2005. Том 145. № 2. С. 256–271.
- Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б. Комплексная модель процессов межгеосферного взаимодействия в тектонических узлах Севера Русской плиты [Электронный ресурс], 2012. URL: <http://www.j-spacetime.com/actual%20content/t1v1/1109.php> (дата обращения 17.12.2024).
- Комаров Ф.Ф. Ионная имплантация в металлы. Москва: Металлургия, 1990. 216 с.
- Ларин Н.В., Ларин В.Н., Горбатилов А.В. Кольцевые структуры, обусловленные глубинными потоками водорода // Дегазация Земли: геотектоника, геодинамика, геофлюиды; нефть и газ; углеводороды и жизнь: материалы Всероссийской конференции с международным участием, посвященной 100-летию со дня рождения акад. П.Н. Кропоткина Москва, 18–22 октября 2010 г.). Москва: ГЕОС, 2010. С. 712.
- Левшунова С.П. О распространении сорбированного водорода в осадочных породах // Геология нефти и газа. № 9. 1982. С. 53–55.
- Левшунова С.П. Водород и его биогеохимическая роль в образовании углеводородных газов в осадочных породах земной коры. Автореферат диссертации ... доктора геол.-мин. наук. Москва, 1994. 200 с.
- Лозовой А.В., Дьякова М.К. Гидрогенизация топлива в СССР. Москва; Ленинград: Академия наук СССР, 1940. 272 с.
- Лосева Т.В., Кузьмичева М.Ю., Спивак А.А. Модель генерации электрических и магнитных импульсов при стесненном повороте блоков земной коры // Проблемы взаимодействия геосфер: сборник научных трудов ИДГ РАН. Москва: ГЕОС, 2009. С. 250–259.
- Малолетнев А.С., Шпирт М.Я. Современное состояние технологий получения жидкого топлива из углей // Российский химический журнал. 2008. Том 52. № 6. С. 44–52.
- Орлов Д.С., Садовникова Л.К., Суханова Н.И. Химия почв. Москва: Высшая школа, 2005. 558 с.
- Перевозчиков Г.В. Поле водорода на месторождении ГАЗЛИ по данным геохимических исследований в нефтегазоносном регионе Средней Азии // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2012. Том 7. С. 1–13.
- Пискарев И.М., Ушканов В.А., Аристов Н.А., Лихачев П.П., Мысливец Т.С. Установление окислительно-восстановительного потенциала воды, насыщенной водородом // Биофизика. 2010. Том 55. № 1. С. 19–24.

- Поляков Б.В., Андриевская Н.В. Химическая технология топлива и углеродных материалов. Гидрогенизационные процессы глубокой переработки нефти. Красноярск: СибГУ, 2017. 83 с.
- Сергеева Н.Г., Ларкина В.И., Сенин Б.В. Выявление зон техногенного загрязнения в морях Северной Атлантики и Северного Ледовитого океана с помощью спутниковых данных // Геодинамика и геологические измерения в окружающей среде северных регионов: сборник материалов всероссийской конференции. Архангельск: ИЭПС УрО РАН, 2004. Том 1. С. 242–246.
- Суханова Н.И., Кирюшин А.В. Особенности гумусного состояния черноземных почв, формирующихся в условиях выхода глубинного водорода в различных условиях увлажнения // Почвы и окружающая среда. 2022. Том 5. № 3. с184. <https://doi.org/10.31251/pos.v5i3.184>
- Суханова Н.И., Кирюшин А.В. Проблемы, возникающие при изучении действия фактора потока эндогенного водорода на почвенный покров // Почвы и окружающая среда [Электронный ресурс]: Сборник научных трудов Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 55-летию Института почвоведения и агрохимии СО РАН (2–6 октября 2023 г., г. Новосибирск). Новосибирск: ИПА СО РАН, 2023. 189–194 с. <https://doi.org/10.31251/conf1-2023>.
- Суханова Н.И., Кирюшин А.В. Изучение влияния эндогенного водорода на почвы: теория и практика // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2024. Том 20. № 2. С. 205–223.
- Суханова Н.И., Трофимов С.Я., Полянская Л.М., Ларин Н.В., Ларин В.Н. Изменение гумусного состояния и структуры микробной биомассы в местах водородной эксгаляции // Почвоведение. 2013. № 2. С. 152–162. <https://doi.org/10.7868/S0032180X13020147>
- Суханова Н.И., Трофимов С.Я., Степанов А.Л., Кирюшин А.В. Особенности черноземных почв района Хоперского глубинного разлома Земной коры // Почвоведение. 2020. № 2. С. 199–209. <https://doi.org/10.31857/S0032180X20020124>
- Степанов А.А., Жаркова Л.В., Степанова Е.А. Применение ¹H-ЯМР спектроскопии для характеристики гуминовых веществ // Почвоведение. 1997. № 2. С. 173–177.
- Сывороткин В.Л. Глубинная дегазация земли и глобальные катастрофы. Москва: Геоинформцентр, 2002. 250 с.
- Сывороткин В.Л. Озонная методика изучения водородной дегазации Земли [Электронный ресурс], 2013. URL: http://www.j-spacetime.com/actual%20content/t4v1/2227-9490e-aprov_r_e-ast4-1.2013.21.php (дата обращения 04.02.2025).
- Травин С.О. Современные методы математического моделирования химических и биологических процессов в окружающей среде // Химическая безопасность. 2018. Том 2. № 1. С. 22–49. <https://doi.org/10.25514/CHS.2018.1.12881>
- Филиппова Д.С. Водород в геологической среде: особенности генерации и аккумуляции // SOCAR Proceedings. 2023. Special Issue No. 2. P. 006–013. <https://doi.org/10.5510/OGP2023SI200885>
- Френкель Я.И. Кинетическая теория жидкостей. Ленинград: Наука, 1975. 592 с.
- Экология человека в изменяющемся мире. Под общ. ред. В.А. Черешнева. Екатеринбург: УрО РАН, 2006. 570 с.
- Яницкий И.Н. Состав и свойства вещества в недрах Земли. Москва: РИЦ ВИМС, 2005. 48 с.
- Greening C., Biswas A., Carere C.R., Jackson C.J., Taylor M.C., Stott M.B., Gook G., Morales S. Genomic and metagenomic surveys of hydrogenase distribution indicate H₂ is a widely utilised energy source for microbial growth and survival // ISME Journal. 2016. No. 10 (3). P. 761–777. <https://doi.org/10.1038/ismej.2015.153>
- Larin N., Zgonnik V., Rodina S., Deville E., Prinzhofer A., Larin V.N. Natural Molecular Hydrogen Seepage Associated with Surficial, Rounded Depressions on the European Craton in Russia // Natural Resources Research. 2015. Vol. 24. No 3. P. 369–383. <https://doi.org/10.1007/s11053-014-9257-5>
- Liu J., Liu Q., Xu H., Zhu D. Genesis and energy significance of natural hydrogen // Unconventional Resources. 2023. Vol. 3. P. 176–182. <https://doi.org/10.1016/j.uncres.2023.01.002>
- Prinzhofer P.A., Moretti I., Francolin J. Pacheco C., D'agostino A., Werly J., Rupin F. Natural hydrogen continuous emission from sedimentary basins: the example of a Brazilian H₂-emitting structure // International Journal of Hydrogen Energy. 2019. Vol. 44. No. 12. P. 5676–5685. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.01.119>
- Sukhanova N.I., Zubkova T.A. State of Organic Matter and Particularities of Physicochemical Properties of Soils in the Endogenous Hydrogen Seepage Zones // Open Journal of Soil Science. 2018. No. 8. P. 186–196. <https://doi.org/10.4236/ojss.2018.88015>

Поступила в редакцию 11.04.2025

Сведения об авторах:

Суханова Наталья Ивановна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник кафедры химии почв факультета почвоведения ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (г. Москва, Россия); vogudin@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4390-9834>

Киришин Алексей Валериевич – кандидат биологических наук, старший преподаватель кафедры химии почв факультета почвоведения ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (г. Москва, Россия); akiriushin@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0773-8804>

Ларин Николай Владимирович – научный сотрудник лаборатории сейсмотектоники и сейсмического микрорайонирования ФГБН Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта РАН (г. Москва, Россия); larin.hydrogen@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/)

The effect of hydrogen on the chernozem redox properties and humus in model experiments

© 2025 N. I. Sukhanova ¹, A. V. Kiryushin ¹, N. V. Larin ²

¹Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory 1, Building 12, Moscow, Russia. Email: vogudin@yandex.ru, akiriushin@mail.ru

²Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, B. Gruzinskaya Street 10, Building 1, Moscow, Russia.

The purpose of the study was to identify changes in the redox environment and a range of chernozem humus characteristics under the influence of hydrogen flux.

Venue and time. The model experiments were carried out in the laboratory of the Faculty of Soil Science of Lomonosov Moscow State University. The experiments used samples of the upper arable horizons of ordinary (Voronezh region) and leached (Lipetsk region) chernozem, selected in the background areas of research sites located beyond the hydrogen flux.

Methods. The total organic carbon content was determined by the dichromate oxidation method, dissolved organic carbon in soil solution was measured by catalytic oxidation with a TOC analyzer with an IR detector, and the values of the redox potential and the pH of the aqueous suspensions were determined potentiometrically. The isolation and purification of humic acid (HA) preparations was carried out by the method recommended by the International Humic Substances Society. The HA elemental composition was determined using a Vario EL III elemental analyzer. Measurement of the element content in soil solution was carried out using the ICP-OES method on an Agilent 5110 optical emission spectrometer. The iron content of non-silicate compounds was measured in a Mehra–Jackson extract, and the iron of weakly crystallized compounds in the composition of non-silicate compounds was measured in a Tamm extract. The NMR ¹H and NMR ¹³C spectra of HA were obtained using a Bruker AMX-400 NMR spectrometer.

Results. In a series of model experiments it was shown that under the influence of hydrogen flux in chernozem redox conditions changed dramatically, the integral indicator of such changes being a decrease in the soil redox potential to extremely low values, while there a slight decrease in the actual acidity was observed. In such conditions, humus was transformed. According to the ¹³C NMR spectra, it can be concluded that soiln waterlogging had little effect on the fragmented composition of humic acids in chernozem, whereas the incoming hydrogen ensures the destruction of the peripheral part of humic molecules without destroying the aromatic clusters. Under conditions of the model experiment, in the presence of a hydrogen flux in the soil the content of citrate-soluble and oxalate-soluble iron increased, indicating the intensification of the gley process. In addition, the processes of removing organic matter from the soil into the soil solution intensified, and the increased aluminum concentration in it indicated the likely destruction of the crystalline lattices of aluminosilicates, which are part of the solid phase of the soil.

Keywords: deep hydrogen; humus; humic acids; fulvic acids; humic preparations; soil organic matter; NMR ^1H and NMR ^{13}C spectra of humic acids of soils.

How to cite: Sukhanova N.I., Kiryushin A.V., Larin N.V. The effect of hydrogen on the chernozem redox properties and humus in model experiments. *The Journal of Soils and Environment*. 2025. 8(3). e310. DOI: [10.31251/pos.v8i3.310](https://doi.org/10.31251/pos.v8i3.310) (in Russian with English abstract).

FUNDING

The work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project No. 121040800154-8).

REFERENCES

- Baryshnikov S.V., Miroshnikova A.V., Kazachenko Yu.S., Malyar A.N., Taran O.P., Lavrenov A.V., Dyakovich L., Kuznetsov B.N. Hydrogenation of Abies Wood and Ethanol Lignin by Hydrogen in Supercritical Ethanol in the Presence of Bifunctional Catalyst Pt/ZrO₂. *Journal of Siberian Federal University. Chemistry*. 2019. Vol. 12. No. 4. P. 550–561. (in Russian). <https://doi.org/10.17516/1998-2836-0150>
- Hydrogen in metals / Georg Alefeld, Johann Völkl (ed.). Springer Berlin, Heidelberg. 1978. Vol. 2. 480 p. <https://doi.org/10.1007/3-540-08883-0>
- Gnidenko A.A. Investigation of the influence of pressure on the behavior of helium and hydrogen in crystalline silicon. Abstract of Dissertation ... Cand. of Phys.-Math. Sci. Khabarovsk, 2005. 98 p. (in Russian).
- Gufeld I.L. The seismic process. Physico-chemical aspects. Korolev: Publishing House TsNIIMash, 2007. 160 p. (in Russian).
- Gufeld I.L. Geological consequences of amorphization of the lithosphere and upper mantle structures caused by hydrogen degassing. *Geodynamics & Tectonophysics*. 2012. Vol. 3. No. 4. P. 417–435. (in Russian). <https://doi.org/10.5800/GT-2012-3-4-0083>
- Gufeld I.L., Gusev G.A., Matveeva M.I. Metastability of the lithosphere as a manifestation of upward diffusion of light gases. *Doklady Earth Sciences*. 1998. Vol. 363. No. 8. P. 1111–1114.
- Zavodinsky V.G., Gnidenko A.A., Misiuk A., Bak-Misiuk J. Effects of Pressure and Hydrogen on the Formation of Vacancies and Divacancies in Crystalline Silicon. *Semiconductors*. 2004. Vol. 38. No. 11. P. 1241–1244. <https://doi.org/10.1134/1.1823052>
- Espaev N.E., Alzhanov M.K. The use of alternative reducing agents in the production of ferrous metals. In book: *Metallurgy of the XXI century through the eyes of the young. Proceedings of the V International Scientific and Practical Conference of Young Scientists and Students (Donetsk, 22 May, 2019)*. Donetsk: DONNTU, 2019. P. 361–362. (in Russian).
- Kanivets V.I. Interaction of hydrogen, methane and hydrogen sulfide with mineral part of soil. *Pochvovedenie*. 1970. No. 5. P. 52–59. (in Russian).
- Kaurichev I.S., Orlov D.S. Redox processes and their role in the genesis and fertility of soils. Moscow: Kolos Publ., 1982. 247 p. (in Russian).
- Kashlev Yu.A. Three Regimes of Diffusion Migration of Hydrogen Atoms in Metals. *Theoretical and Mathematical Physics*. 2005. Vol. 145. No. 2. P. 1590–1603. <https://doi.org/10.1007/s11232-005-0185-8>
- Kutinov Yu.G., Chistova Z. B. A complex model of the processes of inter-geospheric interaction in the tectonic nodes of the North of the Russian plate [Electronic resource], 2012. URL: <http://www.j-spacetime.com/actual%20content/t1v1/1109.php> (accessed on 17.12.2024). (in Russian).
- Komarov F.F. Ion implantation in metals. Moscow: Metallurgia, 1990. 216 p. (in Russian).
- Larin N.V., Larin V.N., Gorbatiykov A.V. Ring structures caused by deep hydrogen flows. In book: *Degassing of the Earth: geotectonics, geodynamics, geofluids; oil and gas; hydrocarbons and life. Proceedings of the All-Russian Conference with international participation dedicated to the 100th anniversary of the birth of Academician P. N. Kropotkin (Moscow 18–22 October, 2010)*. Moscow: GEOS Publ., 2010. P. 712. (in Russian).
- Levshunova S.P. On the distribution of sorbed hydrogen in sedimentary rocks. *Russian Oil and Gas Geology*. 1982. No. 9. P. 53–55. (in Russian).
- Levshunova S.P. Hydrogen and Its Biogeochemical Role in Hydrocarbon Gases Formation in Earth Crust Sedimentaries. Dissertation ... Dr. of Geol.-Mineral. Sci. Moscow, 1994. 200 p. (in Russian).
- Lozovoy A.V., Dyakova M.K. Hydrogenation of fuel in the USSR. Moscow; Leningrad: Academy of Sciences of the USSR, 1940. 272 p. (in Russian).

- Loseva T.V., Kuzmicheva M.Yu., Spivak A.A. Model of generation of electric and magnetic pulses under constrained rotation of blocks of the Earth's crust. Problems of interaction of geospheres. In Book: Collection of scientific papers of the Russian Academy of Sciences. Moscow: GEOS Publ., 2009. P. 250–259. (in Russian).
- Maloletnev A.S., Shpirt M.Ya. The modern state of technologies for production of liquid fuels from coal. Rossijskij Himicheskij Zhurnal. 2008. Vol. 52. No. 6. P. 44–52. (in Russian).
- Orlov D.S., Sadovnikova L.K., Sukhanova N.I. Soil chemistry. Moscow: Higher School, 2005. 558 p. (in Russian).
- Perevozchikov G.V. Geochemical research on hydrogen accumulation in the GAZLI gas field. Petroleum Geology. Theoretical and Applied Studies. 2012. Vol. 7. P. 1–13. (in Russian).
- Piskarev I.M., Ushkanov V.A., Aristova N.A., Likhachev P.P., Myslivets T.S. Establishment of the redox potential of water saturated with hydrogen. Biophysics. 2010. Vol. 55. No. 1. P. 13–17. <https://doi.org/10.1134/S0006350910010033>
- Polyakov B.V., Andrievskaya N.V. Chemical technology of fuels and carbon materials. Hydrogenation processes of deep oil refining. Krasnoyarsk: SibGU, 2017. 83 p. (in Russian).
- Sergeeva N.G., Larkina V.I., Senin B.V. Identification of technogenic pollution zones in the seas of the North Atlantic and the Arctic Ocean using satellite data. In book: Geodynamics and geological measurements in the environment of the northern regions. Proceedings of the All-Russian Conference. Arkhangelsk: IEPS Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2004. Vol. 1. P. 242–246. (in Russian).
- Sukhanova N.I., Kiryushin A.V. Humus status of the chernozem soils formed under deep hydrogen release and different humidification. The Journal of Soils and Environment. 2022. Vol. 5. No. 3. e184. (in Russian). <https://doi.org/10.31251/pos.v5i3.184>
- Sukhanova N.I., Kiryushin A.V. Problems arising in the study of the effect of the endogenous hydrogen flow factor on the soil cover. 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, 2–6 October, 2023). Novosibirsk: ISSA SB RAS, 2023. P. 189–194. (in Russian). <https://doi.org/10.31251/conf1-2023>
- Sukhanova N.I., Kiryushin A.V. Studying the effect of endogenous hydrogen on soils: theory and practice. Geopolitika i ekogeodinamika regionov. 2024. Vol. 20. No. 2. P. 205–223. (in Russian).
- Sukhanova N.I., Trofimov S.Ya., Polyanskaya L.M., Larin N.V., Larin V.N. Changes in the humus state and the structure of microbial biomass in hydrogen exhalation places. Eurasian Soil Science. 2013. Vol. 46. No. 2. P. 135–144. <https://doi.org/10.1134/S1064229313020142>
- Sukhanova N.I., Trofimov S.Y., Stepanov A.L., Kiryushin A.V. Specific features of chernozemic soils in the area of the Koper deep fault in the earth crust. Eurasian Soil Science. 2020. Vol. 53. No. 2. P. 197–206. <https://doi.org/10.1134/S106422932002012X>
- Stepanov A.A., Zharkova L.V., Stepanova E.A. Application of ¹H NMR Spectroscopy for the Characterization of Humic Substances. Pochvovedenie. 1997. No. 2. P. 173–177. (in Russian).
- Syvorotkin V.L. Deep degassing of the earth and global catastrophes. Moscow: Geoinformcentr, 2002. 250 p. (in Russian).
- Syvorotkin V.L. Ozone methodology for studying hydrogen degassing of the Earth [Electronic resource], 2013. URL: http://www.j-spacetime.com/actual%20content/t4v1/2227-9490e-aprov_r_e-ast4-1.2013.21.php (accessed on 04.02.2025). (in Russian).
- Travin S.O. Modern methods of mathematical modeling of environmental chemical and biological processes. Chemical Safety Science. 2018. Vol. 2. No. 1. P. 22–49. (in Russian). <https://doi.org/10.25514/CHS.2018.1.12881>
- Filippova D.S. Hydrogen in the geological environment: features of generation and accumulation. SOCAR Proceedings. 2023. Special Issue No. 2. P. 006–013. <https://doi.org/10.5510/OGP2023SI200885>
- Frenkel Ya.I. Kinetic Theory of liquids. Leningrad: Nauka Publ., 1975. 592 p. (in Russian).
- Human ecology in a changing world. V.A. Chereshevnev (ed.). Yekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2006. 570 p. (in Russian).
- Yanitskiy I.N. Composition and properties of matter in the bowels of the Earth. Moscow: RIC VIMS, 2005. 48 p. (in Russian).
- Greening C., Biswas A., Carere C.R., Jackson C.J., Taylor M.C., Stott M.B., Gook G., Morales S. Genomic and metagenomic surveys of hydrogenase distribution indicate H₂ is a widely utilised energy source for microbial growth and survival. ISME Journal. 2016. No. 10 (3). P. 761–777. <https://doi.org/10.1038/ismej.2015.153>

Larin N., Zgonnik V., Rodina S., Deville E., Prinzhofer A., Larin V.N. Natural Molecular Hydrogen Seepage Associated with Surficial, Rounded Depressions on the European Craton in Russia. *Natural Resources Research*. 2015. Vol. 24. No 3. P. 369–383. <https://doi.org/10.1007/s11053-014-9257-5>

Liu J., Liu Q., Xu H., Zhu D. Genesis and energy significance of natural hydrogen. *Unconventional Resources*. 2023. Vol. 3. P. 176–182. <https://doi.org/10.1016/j.uncres.2023.01.002>

Prinzhofer P.A., Moretti I., Francolin J. Pacheco C., D'agostino A., Werly J., Rupin F. Natural hydrogen continuous emission from sedimentary basins: the example of a Brazilian H₂-emitting structure. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019. Vol. 44. No. 12. P. 5676–5685. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.01.119>

Sukhanova N.I., Zubkova T.A. State of Organic Matter and Particularities of Physicochemical Properties of Soils in the Endogenous Hydrogen Seepage Zones. *Open Journal of Soil Science*. 2018. No. 8. P. 186–196. <https://doi.org/10.4236/ojss.2018.88015>

Received 11 April 2025

Accepted 19 August 2025

Published 15 September 2025

About the authors:

Natalia I. Sukhanova – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher with the Department of Soil Chemistry, Faculty of Soil Science, Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russia); vogudin@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4390-9834>

Alexey V. Kiryushin – Candidate of Biological Sciences, Senior Lecturer with the Department of Soil Chemistry, Faculty of Soil Science, Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russia); akiriushin@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0773-8804>

Nikolay V. Larin – Researcher in the Laboratory of Seismotectonics and Seismic Microdistricting at the Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia); larin.hydrogen@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/)

ПРИЛОЖЕНИЕ

На каждом рисунке диаграмм представлено по три группировки данных (рис. 1–6).

«фон» – это значения окислительно-восстановительного потенциала (ОВП) и pH почвенных образцов в контрольных вариантах (без потока водорода) модельного опыта 2.

«до пропускания» – это значения ОВП и pH в тот же день, прямо перед пропусканием водорода через почву.

«после пропускания» – это значения ОВП и pH в тот же день сразу после пропускания водорода через почву.

Цветами обозначены дни, в которые проводилось пропускание водорода через почву и измерения показателей.

Условные обозначения на графиках размаха (рис. 1–6):

× Среднее

– Медиана

□ Межквартильный размах (25%–75%)

| Диапазон вариации

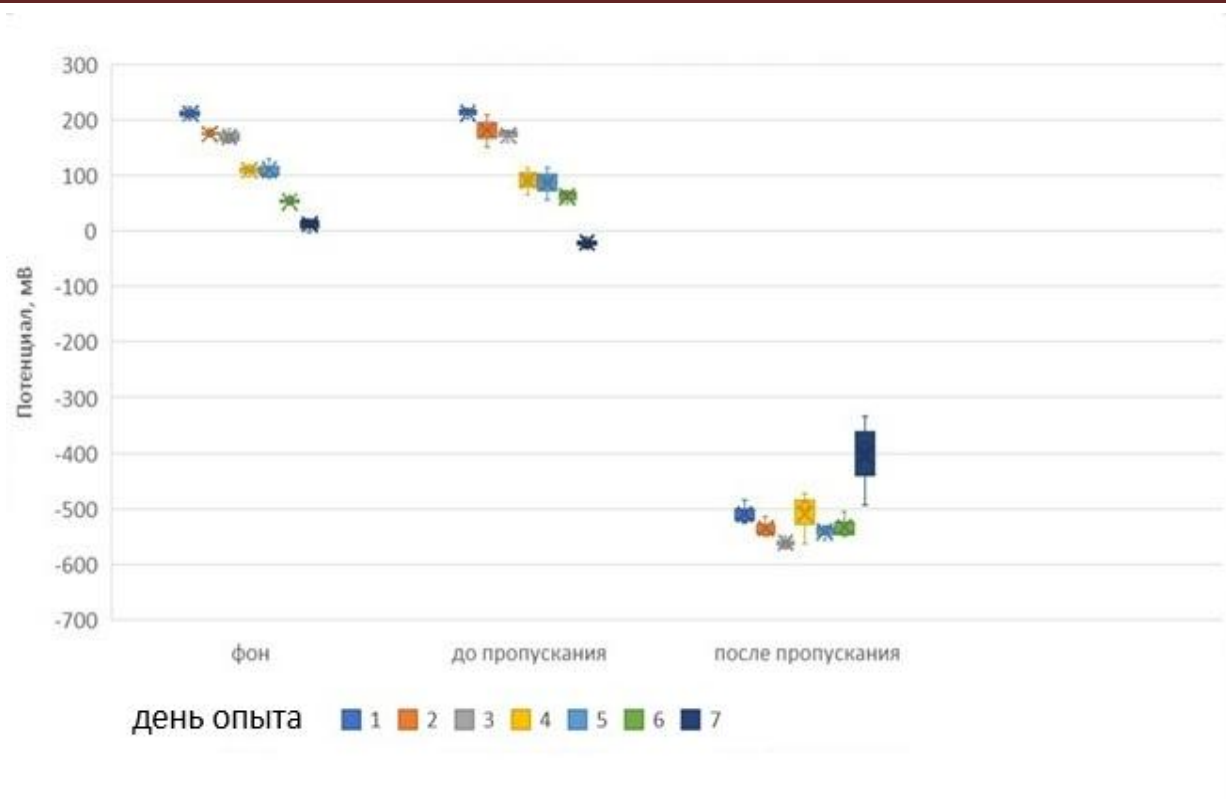


Рисунок 1. ОВП почв до и после пропускания водорода, 1 этап.

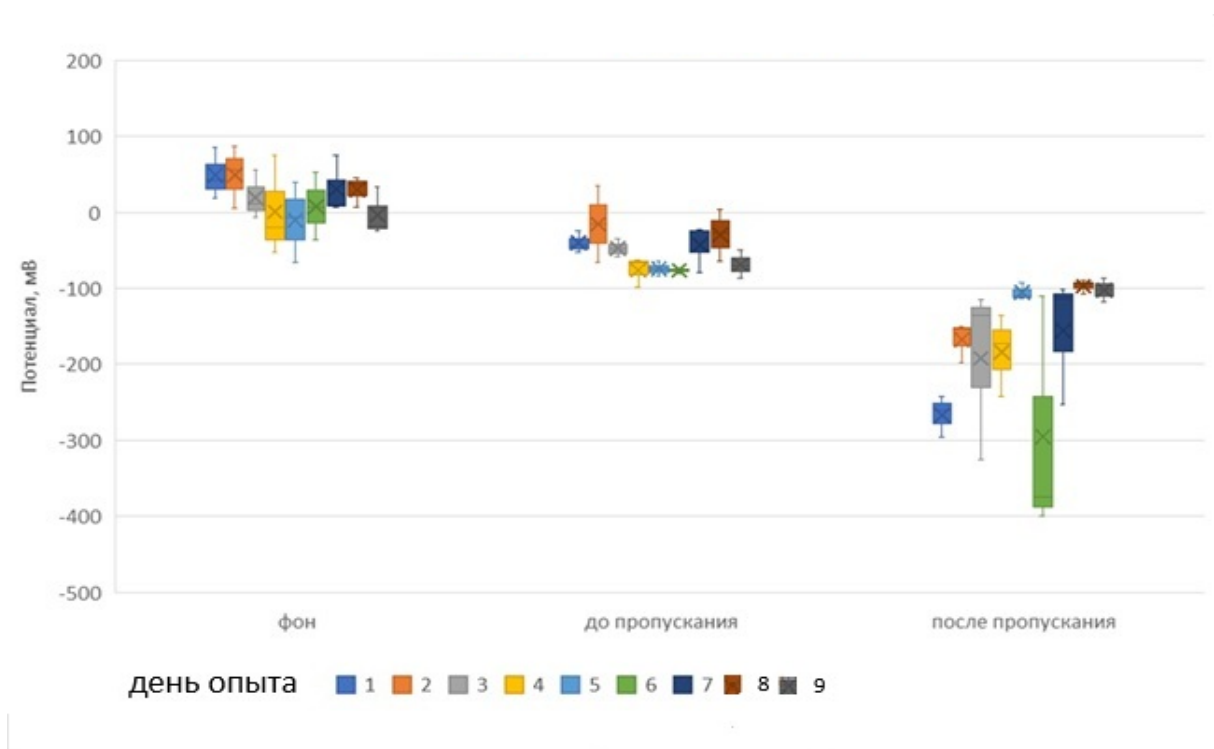


Рисунок 2. ОВП почв до и после пропускания водорода, 2 этап.

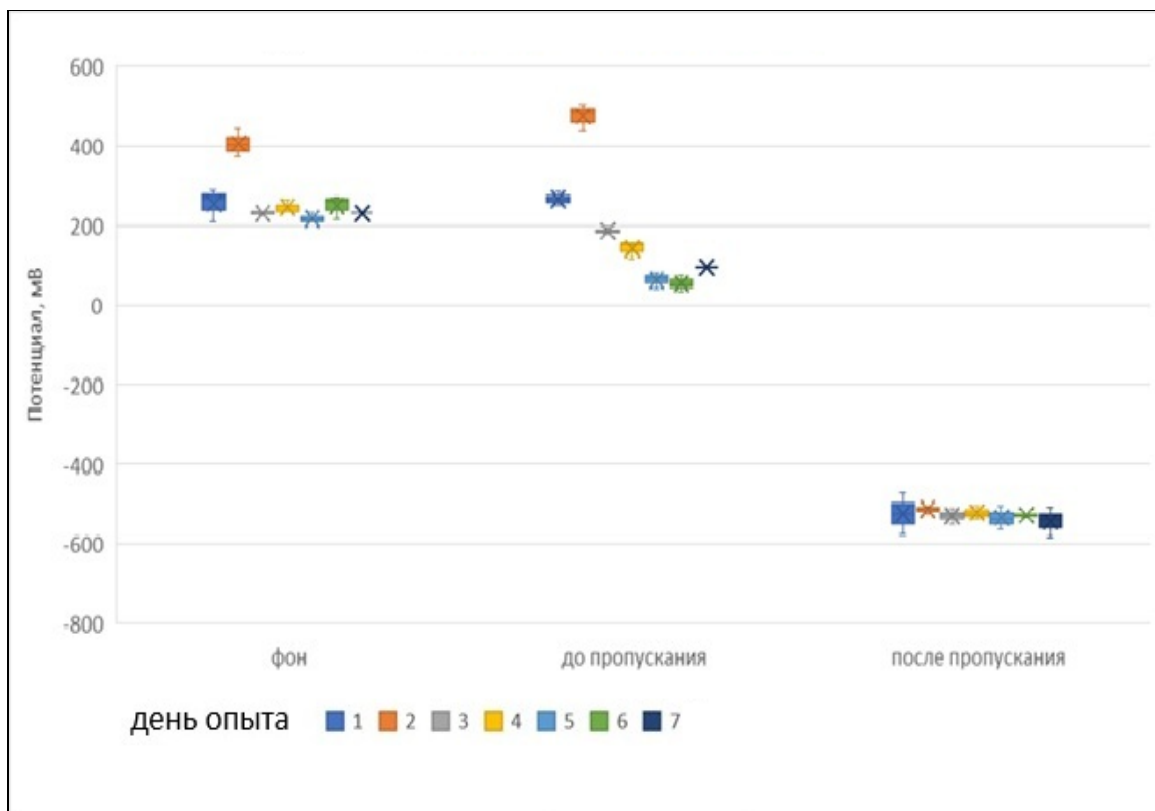


Рисунок 3. ОВП почв до и после пропускания водорода, 3 этап.

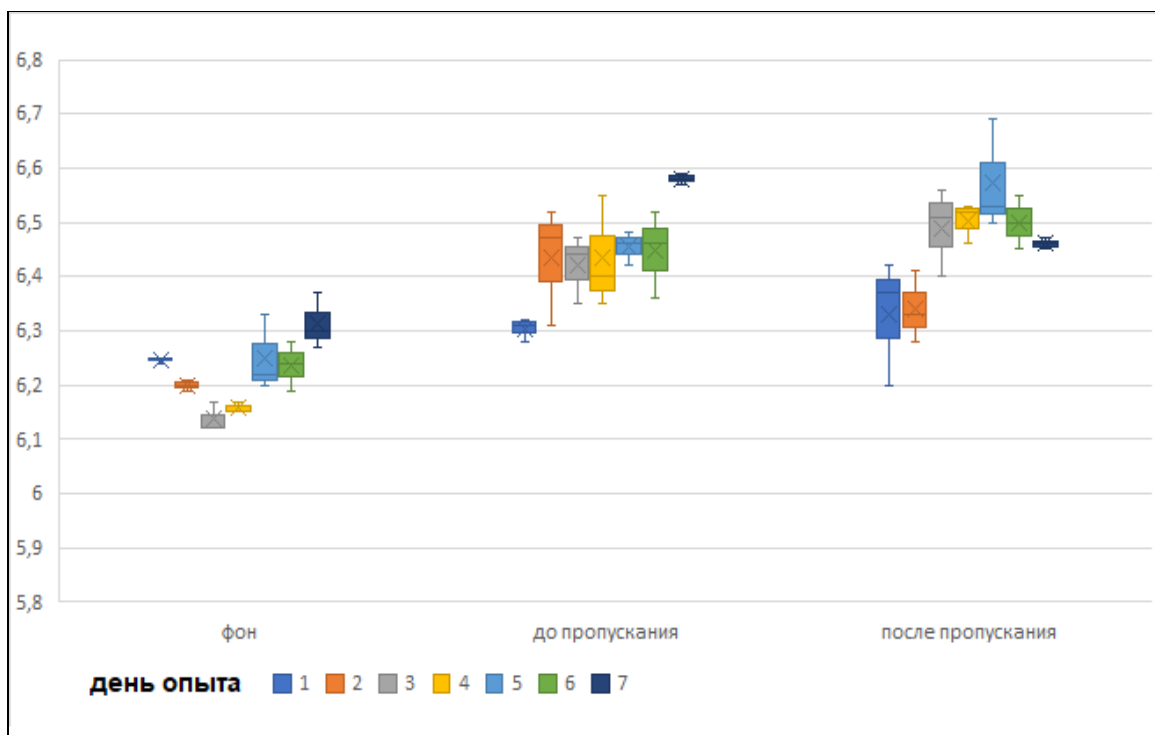


Рисунок 4. pH почвенных образцов до и после пропускания водорода, 1 этап.

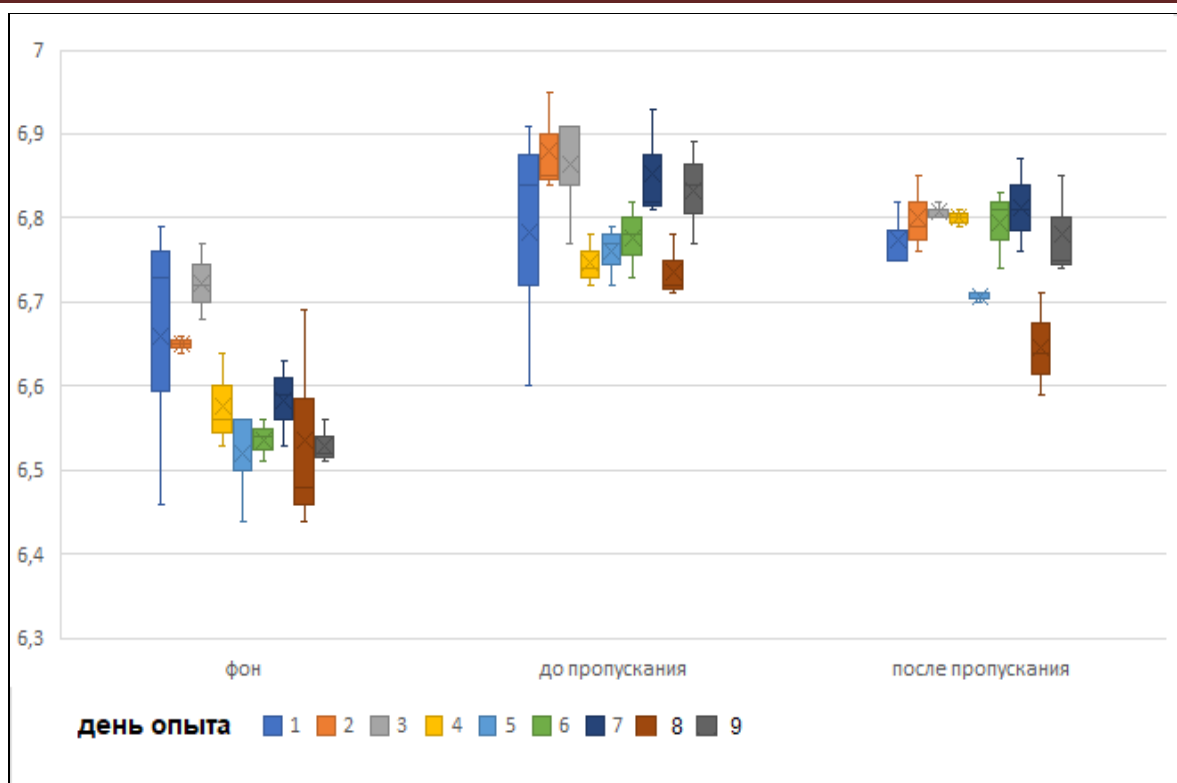


Рисунок 5. pH почвенных образцов до и после пропускания водорода, 2 этап.

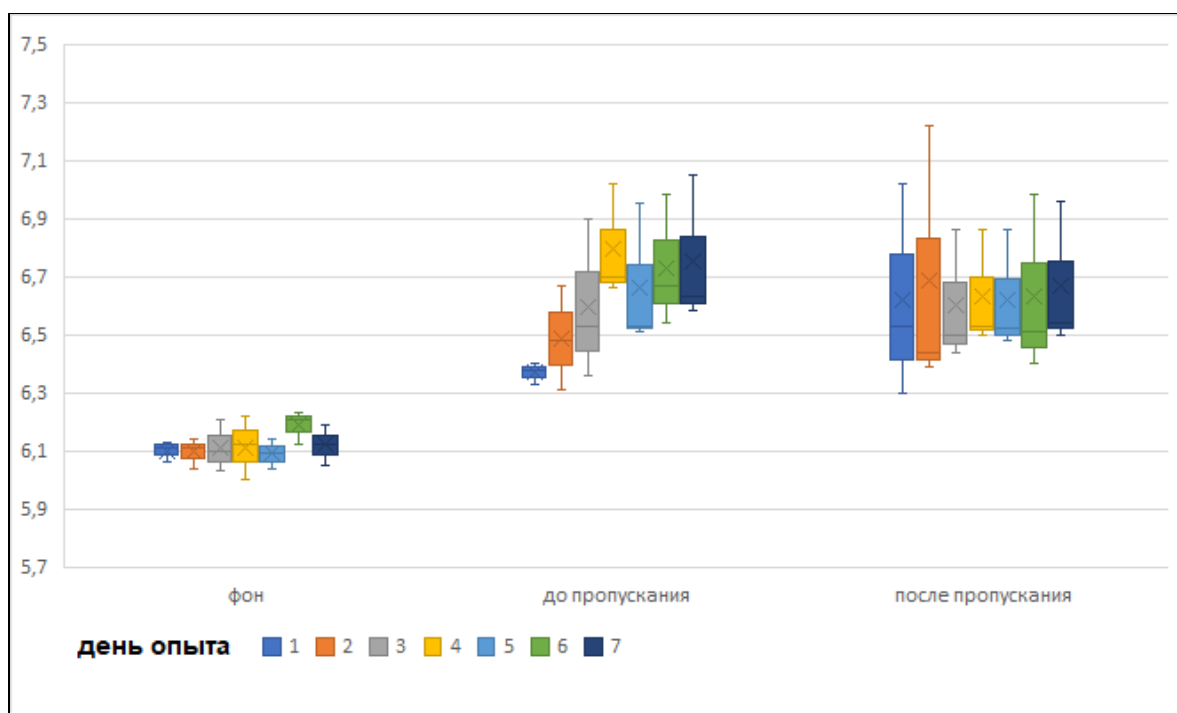


Рисунок 6. pH почвенных образцов до и после пропускания водорода, 3 этап.

Таблица 1

Доверительные интервалы средних значений ОВП и pH почвенных образцов по начальным и конечным точкам измерений этапов модельного опыта 2

Этап	Вариант	ОВП ± дов. инт., P=0,95		pH ± дов. инт., P=0,95	
		день опыта			
		первый	последний	первый	последний
1	фон	211 ± 13	11 ± 29	6,25 ± 0,01	6,31 ± 0,06
	после пропускания H ₂	-510 ± 25	-405 ± 92	6,33 ± 0,13	6,46 ± 0,01
2	фон	49 ± 38	-3 ± 36	6,66 ± 0,20	6,53 ± 0,03
	после пропускания H ₂	-267 ± 30	-102 ± 18	6,77 ± 0,05	6,78 ± 0,07
3	фон	254 ± 47	231 ± 1	6,10 ± 0,04	6,12 ± 0,08
	после пропускания H ₂	-523 ± 60	-543 ± 44	6,62 ± 0,42	6,67 ± 0,29

Таблица 2

Доверительные интервалы средних значений ОВП и pH почвенных образцов по начальным и конечным точкам измерений этапов модельного опыта 2

Этап	Вариант	ОВП ± дов. инт., P=0,95		pH ± дов. инт., P=0,95	
		день опыта			
		первый	последний	первый	последний
1	фон	211 ± 13	11 ± 29	6,25 ± 0,01	6,31 ± 0,06
	до пропускания H ₂	213 ± 12	-21 ± 9	6,30 ± 0,02	6,58 ± 0,01
2	фон	49 ± 38	-3 ± 36	6,66 ± 0,20	6,53 ± 0,03
	до пропускания H ₂	-40 ± 16	-69 ± 22	6,78 ± 0,18	6,83 ± 0,07
3	фон	254 ± 47	231 ± 1	6,10 ± 0,04	6,12 ± 0,08
	до пропускания H ₂	267 ± 20	95 ± 3	6,37 ± 0,04	6,75 ± 0,29

Преобразование солевого состава почв Ишимской степи при изменении их влажности

© 2025 В. В. Попов ¹, Ю. В. Кравцов ², Н. В. Елизаров ¹

¹ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, проспект Академика Лаврентьева, 8/2, г. Новосибирск, 630090, Россия. E-mail: vik632288@yandex.ru, elizarov_89@mail.ru

²ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный педагогический университет», ул. Виллюйская, 28, г. Новосибирск, 630126, Россия. E-mail: kravtsov60@mail.ru

Цель исследования. Изучить преобразование солевого состава почв Ишимской степи при изменении их влажности путем сравнения химического состава водной вытяжки и почвенного раствора при естественной и повышенной влажности этих почв.

Место проведения. Анализ проводили на почвенных образцах, отобранных на Ишим-Иртышском степном междуречье (Ишимская степь) в пределах Омской области.

Методы. Использовали сравнительно-аналитический метод при сопоставлении химического состава водной вытяжки, увлажненного почвенного раствора и почвенного раствора естественной влажности.

Основные результаты. Выявлено влияние изменения влажности на ионно-солевою систему тяжелосуглинистых почв Ишимской степи. При возрастании влагосодержания почвы количество растворенных солей в ней неизменно возрастает, что связано с растворимостью как твердых солей, находящихся в почве, так и с протекающими процессами ионного обмена. Такое увеличение связано, главным образом, с ростом концентрации HCO_3^- , SO_4^{2-} и Na^+ . В образцах, не содержащих гипс, наблюдается снижение содержания ионов Ca^{2+} и Mg^{2+} в водной вытяжке по сравнению с почвенным раствором. В образцах, содержащих гипс, напротив, происходит скачкообразное синхронное увеличение не только иона кальция и сульфат-иона, но и катиона магния в водной вытяжке. При увеличении влажности отмечается изменение в соотношении между отдельными ионами, существенно изменяя химизм засоления.

Заключение. Увеличение влажности приводит к изменению почвенного раствора по соотношению анионов в направлении сульфатного, а иссушение – в направлении хлоридного типа. По соотношению катионов при увеличении влажности – к натриевому, а при иссушении – к магниевому типу.

Ключевые слова: Ишимская степь; почвенный раствор; водная вытяжка; влажность почвы; солевой состав, засоление, ионно-солевой профиль.

Цитирование: Попов В.В., Кравцов Ю.В., Елизаров Н.В. Преобразование солевого состава почв Ишимской степи при изменении их влажности // Почвы и окружающая среда. 2025. Том 8. № 3. e322. DOI: [10.31251/pos.v8i3.322](https://doi.org/10.31251/pos.v8i3.322)

ВВЕДЕНИЕ

Ишимская степь (Ишим-Иртышское степное междуречье) представляет собой важный аграрный регион Сибири, в пределах которого сельское хозяйство специализируется на производстве преимущественно яровых зерновых культур и многолетних трав. Получение высоких стабильных урожаев возделываемых культур в пределах названного района зависит от влияния многих природных факторов. Среди них можно выделить: контрастный режим влажности пахотных почв в течение теплого сезона года, продолжительное и глубокое сезонное промерзание почвенно-грунтовых толщ и позднее их прогревание до активных температур (Кравцов, 2024), близкое к земной поверхности залегание минерализованных грунтовых вод, засоленность глубоких горизонтов почв, динамичность солевого состава почв во времени и в пространстве. Изменение содержания влаги в почве приводит к нарушению термодинамического баланса в ионно-солевой системе, что влечет за собой изменение концентрации и состава почвенных растворов (Попов, 2020).

Поскольку солевой состав почв оказывает непосредственное влияние на глубину проникновения корневой массы культурных растений и доступность запасов влаги для выращиваемых культур, установление закономерностей преобразования солевого состава почв является важной практической задачей (Попов, 2019; Попов, 2022).

Цель исследования: изучить преобразование солевого состава почв Ишимской степи при изменении их влажности путем сравнения химического состава водной вытяжки и почвенного раствора при естественной и повышенной влажности этих почв.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ проводили на почвенных образцах, отобранных в степной зоне Ишимской равнины в пределах Омской области. Почвенный покров данной территории сформирован, преимущественно, лугово-степными комплексами, господствующее положение в которых занимают черноземы южные маломощные, малогумусные и карбонатные (Панфилов и др., 1988). Характерной особенностью данных черноземов является засоление нижних горизонтов почвенного профиля и подстилающих пород. В комплексе с ними, в пределах замкнутых микропонижений рельефа, характеризующихся дополнительным поверхностным увлажнением, залегают черноземно-луговые и лугово-черноземные почвы. Пологие склоны немногочисленных мезопонижений заняты почвами различной степени луговости. Площадь солонцовых почв невелика. Они формируются в виде пятен в комплексе с солончаковатыми лугово-черноземными и черноземно-луговыми почвами вокруг мезопонижений.

Солевые профили автономных почв характеризуются единообразным строением. В них выделяются три основные зоны: зона выщелачивания легкорастворимых солей с незасоленной верхней и слабо засоленной (до 2–4 ммоль(экв)/100 г) нижней половиной; гипсово-аккумулятивная зона с повышенным содержанием сульфатов кальция и магния в водных вытяжках; безгипсовая зона с равномерным распределением солей на глубине до 4–6 метров, где наблюдается увеличение хлоридно-сульфатного коэффициента с увеличением глубины. Региональные и зональные различия в степени засоления почв и глубине залегания солевых горизонтов объясняются климатическими особенностями и гранулометрическим составом почвообразующих пород (Сеньков, 2004).

Грунтовые воды минерализованы в строгом соответствии с засолением вмещающих пород зоны аэрации. Это же, в целом, относится и к солевому составу грунтовых вод и вмещающих пород (Сеньков, 1988).

В данной статье представлены результаты по пяти почвенным разрезам: солонец глубокий малонатриевый чернозёмный (Haplic Solonetz; 53°46'8,25" с.ш., 74°5'51,12" в.д.) и чернозём южный глубокосолончаковатый (Salic Chernozem; 53°46'17,71" с.ш., 74°5'40,21" в.д.) расположены к юго-востоку от д. Ротовка Русско-Полянского района; солонец средний средненатриевый черноземно-луговой (Gleyic Solonetz; 53°43'27,04" с.ш., 73°47'30,91" в.д.) и солонец мелкий средненатриевый черноземно-луговой (Gleyic Solonetz; 53°43'17,05" с.ш., 73°47'29,71" в.д.) находятся к западу от д. Невольное Русско-Полянского района; солончак типичный глубокопрофильный (Haplic Solonchak; 54°34'29,59" с.ш., 73°35'16,60" в.д.) расположен к западу от р.п. Таврическое Таврического района. Названия почв выше приведены согласно классификации почв СССР (Классификация ..., 1977) и международной классификации World Reference Base for Soil Resources (WRB, 2022).

Из разрезов глубиной до 1,5 м отбирали образцы по генетическим горизонтам. Со дна разреза до водоносного горизонта отбор образцов осуществляли при помощи ручного бурения. Отобранные образцы, во избежание изменения влажности, плотно упаковывали в полиэтиленовые пакеты и транспортировали в лабораторию. В лабораторных условиях одна часть почвенного образца уходила на определение влажности почвы и выделение почвенного раствора естественной влажности. Другую часть увлажняли путем добавления дистиллированной воды (в количестве 50 мл на 500 г почвы) и плотно упаковывали. После чего выжидали двое суток для восстановления термодинамического равновесия в системе «вода–почва», с последующим отпрессовыванием почвенного раствора. Третью часть почвенного образца высушивали до воздушно-сухого состояния и использовали для исследования химического состава водной вытяжки.

При изучении динамики солевого состава почв использовали сравнение химического состава водной вытяжки, увлажненного почвенного раствора и почвенного раствора при естественной влажности. Для приготовления водной вытяжки применяли традиционное для России соотношение 1 : 5 (почва : вода). Для получения почвенных растворов применяли метод отделения почвенных растворов от твердой фазы почв при помощи давления (рис. 1), разработанный П.А. Крюковым (1971) и усовершенствованный А.А. Сеньковым (2004).

Аналитические работы осуществляли в ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (Новосибирск). Определение рН почвы проводили потенциометрическим методом по ГОСТ 26423-85, определение ионов карбоната и бикарбоната в водной вытяжке – по ГОСТ 26424-85, хлорид-ионов и сульфат-ионов – по ГОСТ-26425-85, ионов натрия и калия – по ГОСТ 26427-85, ионов кальция и магния – комплексонометрическим методом по ГОСТ 26428-85 (Минеев, 2001). Влажность грунта устанавливали термостатно-весовым методом (Шейн и др., 2016). Химический анализ почвенных образцов проводили в трех аналитических повторностях ($n = 3$).

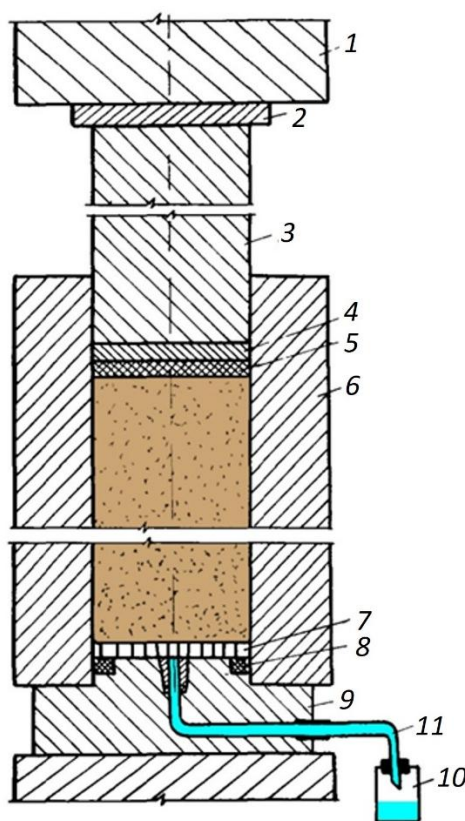


Рисунок 1. Схема для отпрессовывания почвенных растворов. 1 – площадка пресса; 2 – стальная прокладка; 3 – поршень; 4 – эбонитовый диск; 5 – резиновая прокладка; 6 – цилиндр; 7 – поршень; 8 – резиновое кольцо; 9 – поддонник; 10 – приёмник. Составлено по: (Крюков, 1971).

Химизм засоления почвенных растворов устанавливали по классификации (Базилевич, Панкова, 1968), основанной на оценке засоления по преобладанию, как катионов, так и анионов. Данная классификация применяется в настоящее время (Засоленные почвы России, 2006; Черноусенко и др., 2017).

Рассчитывали средние арифметические значения, значимость различий оценивали при $P = 0,95$. Для анализа данных использовали MS Excel 2010 и библиотеку статистической обработки данных Pandas 2.2.3 для языка Python 3.12.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Сравнение химического состава почвенных растворов естественной влажности, увлажненных почвенных растворов и водной вытяжки было проведено на примере солонца глубокого малонатриевого чернозёмного тяжелосуглинистого. Характерными особенностями данной почвы являются: достаточно глубокое залегание грунтовых вод (520 см), наличие двух аккумулятивно-гипсовых горизонтов на глубине 65–75 см и 180–200 см, высокое содержание обменного магния в солонцовом горизонте (более 45% от ЕКО). Ионный состав почвенных растворов представлен в табл. 1. Очевидно, что увеличение влажности почвы сопровождается снижением минерализации почвенных растворов, однако динамика концентраций отдельных ионов не пропорциональна данному снижению.

Прямое сопоставление результатов водной вытяжки и почвенных растворов затруднительно по причине существенных различий в количестве ионов. Поэтому данные о концентрации ионов были пересчитаны на содержание их в 100 г почвы по следующей формуле (Засоленные почвы России, 2006):

$$S = \frac{C(W - W_r)}{1000}$$

где S – концентрация иона, ммоль(экв)/100 г;

C – концентрация иона в почвенном растворе, ммоль(экв)/л;

W – влажность почвы, из которой получен раствор, %;

W_r – влажность гигроскопическая, %.

Результаты получившихся аналитических данных представлены в таблице 2.

Таблица 1

Концентрация основных солеобразующих ионов в почвенных растворах солонца глубокого малонатриевого при различной влажности (среднее арифметическое, n = 3)

Глубина, см	Влажность, %	Сумма солей, г/л	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺
			ммоль(экв)/л					
0–25	11,0	2,27	1,80	18,00	1,44	16,80	9,50	9,65
	23,9	1,25	3,80	7,50	0,98	6,60	4,25	6,70
30–40	13,5	19,90	4,80	286,00	12,76	68,40	112,50	166,96
	20,9	13,39	4,00	182,00	14,03	46,20	79,17	112,18
42–52	16,0	30,17	6,00	426,00	79,06	76,80	208,34	244,18
	25,1	20,63	4,40	282,00	57,30	43,80	123,00	189,40
52–62	18,5	32,56	6,00	459,00	98,60	76,80	212,50	269,23
	23,6	24,51	4,80	335,00	76,49	53,40	154,17	220,18
65–75	18,2	32,91	6,40	456,00	108,40	77,40	227,17	272,36
	24,2	23,94	5,60	308,00	98,42	58,20	139,67	204,53
85–95	14,8	33,54	6,00	493,00	95,84	79,80	229,17	276,53
	18,0	24,70	4,40	349,00	79,49	57,00	150,00	219,14
107–117	11,6	34,59	5,60	510,00	92,68	90,00	254,17	284,88
140–150	11,6	37,39	3,60	582,00	90,38	99,00	266,67	292,19
180–200	12,2	37,08	5,60	574,00	90,22	96,00	245,84	301,06
250–270	11,4	32,02	3,20	495,00	80,88	81,00	185,50	276,53
360–370	19,3	24,83	3,60	367,00	66,74	68,20	128,84	232,36
420–450	22,6	23,79	4,00	352,00	62,42	64,80	120,84	226,16
500–520	23,9	21,55	4,40	318,00	59,74	60,00	108,34	196,70

Таблица 2

Содержание основных солеобразующих ионов в почвенных растворах при различной влажности и в водной вытяжке солонца глубокого малонатриевого (среднее арифметическое, n = 3)

Глубина, см	Влажность, %	Сумма солей, %	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺
			ммоль(экв)/100 г					
0–25	11,0	0,011	0,01	0,14	0,01	0,13	0,08	0,08
	23,9	0,019	0,08	0,16	0,02	0,14	0,09	0,14
	*В.в.	0,057	0,53	0,16	0,13	0,21	0,13	0,29
30–40	13,5	0,183	0,05	3,00	0,13	0,72	1,18	1,75
	20,9	0,210	0,07	3,26	0,25	0,83	1,42	2,01
	В.в.	0,280	0,50	3,31	0,82	0,21	0,47	3,65
42–52	16,0	0,374	0,08	5,54	1,03	1,00	2,71	3,17
	25,1	0,434	0,10	6,23	1,27	0,97	2,72	4,19
	В.в.	0,478	0,59	5,47	1,86	0,37	0,75	6,30
52–62	18,5	0,487	0,09	7,11	1,53	1,19	3,29	4,17
	23,6	0,488	0,10	6,90	1,58	1,10	3,18	4,54
	В.в.	0,530	0,76	5,96	2,02	0,52	1,12	6,70
65–75	18,2	0,488	0,10	6,93	1,65	1,18	3,45	4,14
	24,2	0,496	0,12	6,53	2,09	1,23	2,96	4,34
	В.в.	1,214	0,49	6,32	12,52	6,36	5,00	7,60
85–95	14,8	0,388	0,07	5,82	1,13	0,94	2,70	3,26
	18,0	0,365	0,07	5,24	1,19	0,86	2,25	3,29
	В.в.	0,544	0,65	5,78	2,57	0,77	1,47	6,33
107–117	11,6	0,293	0,05	4,39	0,80	0,77	2,19	2,45
	В.в.	0,592	0,54	4,68	4,27	1,59	2,20	5,74
140–150	11,6	0,317	0,03	5,01	0,78	0,85	2,29	2,51
	В.в.	0,470	0,62	4,96	2,17	0,52	1,00	5,74
180–200	12,2	0,336	0,05	5,28	0,83	0,88	2,26	2,77
	В.в.	1,248	0,50	5,20	13,95	7,46	5,41	6,58
250–270	11,4	0,266	0,03	4,16	0,68	0,68	1,56	2,32
	В.в.	0,453	0,63	5,52	1,58	0,42	0,82	5,54
360–370	19,3	0,400	0,06	5,98	1,09	1,11	2,10	3,79
	В.в.	0,497	0,63	5,82	1,98	0,57	0,90	5,99
420–450	22,6	0,461	0,08	6,90	1,22	1,27	2,37	4,43
	В.в.	0,531	0,62	6,36	1,96	0,67	0,97	6,59
500–520	23,9	0,445	0,09	6,65	1,25	1,25	2,26	4,11
	В.в.	0,523	0,60	6,08	2,05	0,75	0,89	6,48

Примечание. * Водная вытяжка.

ОБСУЖДЕНИЕ

Аналитические данные показывают, что дополнительное увлажнение почвы приводит к увеличению концентрации в ней легкорастворимых солей. Это обусловлено растворением твердых солей, присутствующих в почве, а также с процессами ионного обмена. Среднее значение суммы солей по профилю солонца глубокого малонатриевого в водной вытяжке на 67% больше, чем в почвенном растворе. Такое увеличение обусловлено, главным образом, возрастанием концентраций HCO_3^- , SO_4^{2-} и Na^+ . Концентрация иона Cl^- остается практически неизменной при динамике влажности, поскольку хлоридные соли обладают высокой растворимостью и, следовательно, максимально присутствуют в растворе. Исключение составляют случаи, когда соединения хлора, находясь в кристаллическом виде, полностью не переходят в раствор при отпрессовывании почвенного раствора. В слое 52–75 см, напротив, наблюдается уменьшение содержания хлоридов в водной вытяжке на 12% по сравнению с почвенным раствором; однако в среднем по профилю разница составляет менее 2%. Вероятно, это явление, несмотря на то, что поглощение иона Cl^- в почве сильно ограничено, связано с адсорбцией анионов (Bresler et al., 1982), особенно характерной для почв с нейтральной и кислой средой.

Количество HCO_3^- в водных вытяжках оказывается значительно большим, чем в почвенных растворах. Это обусловлено частичным растворением CaCO_3 и MgCO_3 при повышении увлажнения почвы, что приводит к увеличению их количества в почвенных растворах, и, особенно, в водных вытяжках. В среднем по профилю количество аниона в вытяжке в 10 раз превышает таковое в почвенном растворе.

Содержание сульфат-иона в водных вытяжках связано с присутствием кристаллического гипса в почве, который при возрастании увлажнения переходит из твердой фазы в почвенный раствор. Поэтому содержание SO_4^{2-} в вытяжках из гипсосодержащих слоев всегда завышено и обусловлено растворяющимся сульфатом кальция. Так, в гипсовых горизонтах солонца (65–75 см и 180–200 см) отмечается скачкообразное повышение количества SO_4^{2-} в водной вытяжке, которое более чем в десять раз превышает значения в почвенном растворе. Данное явление хорошо известно, поэтому при оценке засоления принято расчетным способом находить содержание токсичных солей и по нему оценивать степень засоления почвы (Минашина, 1970; Муратова, Маргулис, 1971; Базилевич, Панкова, 1972). Однако такую оценку засоления почв нельзя считать корректной. Дело в том, что при проведении расчетов из общего количества перешедших в водную вытяжку солей вычитают все количество SO_4^{2-} , Ca^{2+} и предполагаемых карбонатных ионов, оказавшихся в водной вытяжке вследствие растворения гипса и карбоната кальция, тогда как в реальной почве часть этих ионов находится в составе почвенного раствора, влияет на осмотическое давление почвенной влаги, степень и химизм засоления почвенного раствора и почвы в целом (Засоленные почвы России, 2006).

При повышении влажности в почвенном растворе, помимо растворения твердых солей, активно протекают реакции ионного обмена между катионами ППК. В каждом из исследованных почвенных образцов рассматриваемого разреза отмечается увеличение концентрации катионов Na^+ в водной вытяжке по сравнению с почвенным раствором. В среднем по профилю увеличение Na^+ произошло на 89%, при этом наибольшие значения разницы в концентрациях (3,46 и 3,81 ммоль(экв)/100 г) приходятся на гипсовые горизонты (65–75 и 180–200 см, соответственно).

В образцах, не содержащих гипс, наблюдается снижение содержания ионов Ca^{2+} и Mg^{2+} (в среднем на 36% и 46%, соответственно) в водной вытяжке по сравнению с почвенным раствором. Данное явление обусловлено тем, что увлажнение почвы приводит к увеличению коэффициентов активности двухвалентных катионов в большей степени, чем одновалентных, вследствие распада ионных комплексов (Bresler et al., 1982). В результате этого процесса ионы Ca^{2+} и Mg^{2+} поглощаются из раствора, а ионы Na^+ вытесняются из почвенного комплекса в раствор. Таким образом, с увеличением влажности почвы концентрация ионов Na^+ в почвенном растворе возрастает, тогда как содержание ионов Ca^{2+} и Mg^{2+} в безгипсовых горизонтах снижается.

В содержащих гипс образцах наблюдается явление синхронного увеличения кальция и магния в водной вытяжке. Данное явление присуще абсолютно всем почвам, в профиле которых присутствует то или иное количество гипса (Сеньков, 1988). Увеличение Ca^{2+} , как отмечалось выше, обусловлено переходом кальция гипса из фазы твердых солей в почвенный раствор. Увеличение содержания ионов Mg^{2+} происходит вследствие вытеснения магния из почвенно-поглощающего комплекса кальцием, который высвобождается при растворении кристаллов гипса (Панин и др., 1977; Сеньков, 1988). В результате концентрация Ca^{2+} и Mg^{2+} в водной вытяжке из гипсоносных горизонтов значительно превышает их реальное содержание в почвенных растворах. Согласно данным других исследований (Почвообразование и антропогенез ..., 1991), химический состав почвенных растворов не зависит от

количества гипса в почве. Различия в результатах определений не являются статистически значимыми и находятся в пределах погрешности.

Таким образом, при увеличении влажности почвы происходит растворение твердых солей, а также активно протекают реакции ионного обмена между образующимся раствором солей и обменными основаниями почвы. Эти процессы приводят, в том числе, к изменению ионного состава водной вытяжки, который становится отличным от состава почвенного раствора естественной влажности. Степень искажения зависит от концентрации и состава солей, емкости катионного обмена и состава поглощенных оснований. Следовательно, установление корреляционных связей между составом почвенного раствора и водной вытяжки затруднительно (рис. 2). Самые большие значения коэффициента детерминации наблюдаются между ионами хлора и ионами натрия ($R^2=0,37$ и $R^2=0,36$, соответственно). Хотя данные значения характеризуют умеренную объясняющую способность, тем не менее, недостаточны для построения прогноза.

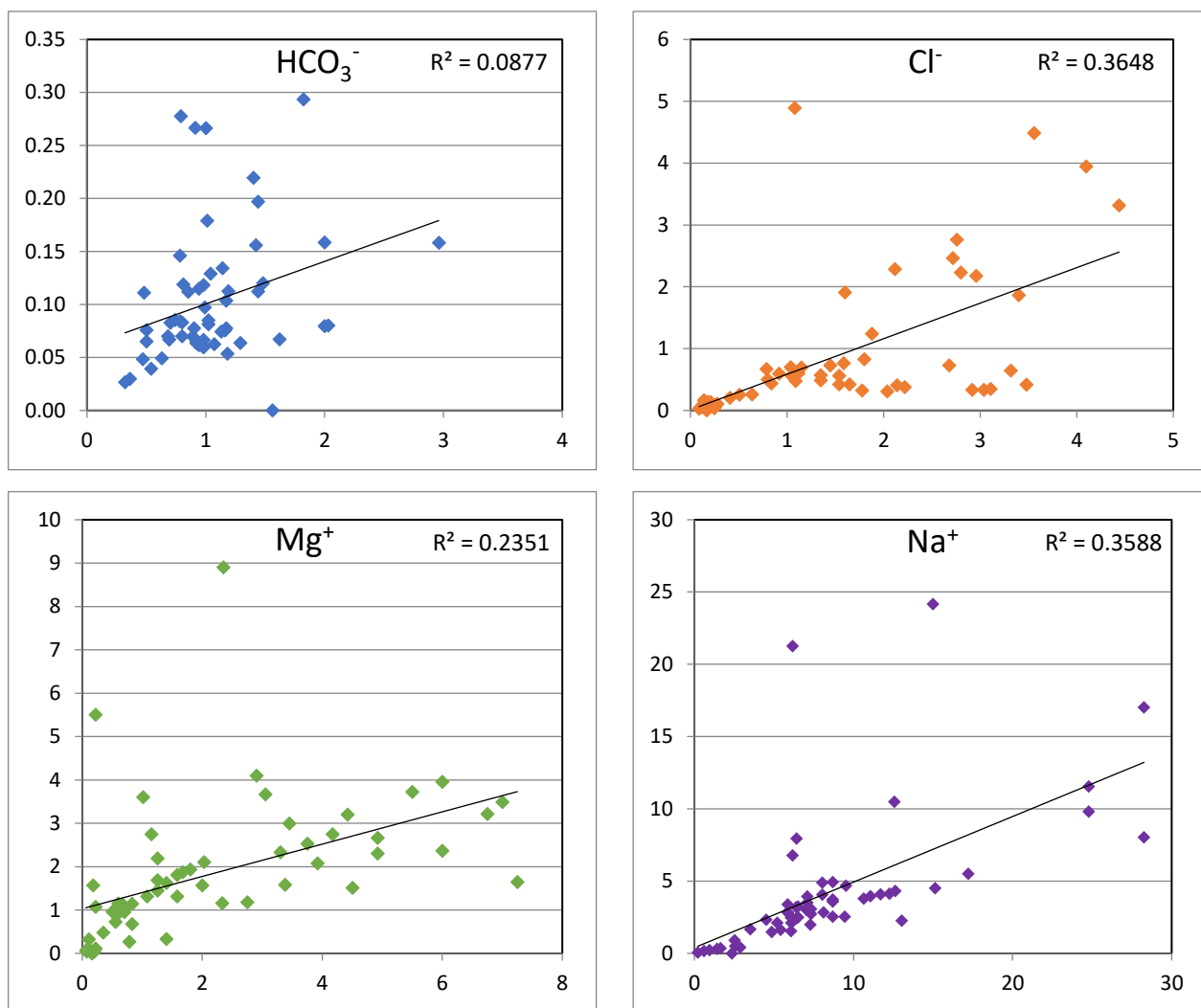


Рисунок 2. Зависимость содержания ионов почвенного раствора от содержания их в водной вытяжке (ммоль(экв)/100 г). Ось x – водная вытяжка, ось y – почвенный раствор. Величина $P < 0,05$.

При увеличении влажности происходит изменение в соотношении между отдельными ионами, что существенно изменяет химизм засоления. Как видно из таблицы 3, тип засоления по анионам совпадает лишь в слое 30–40 см, а по катионам – только в слое 107–117 см. Химизм засоления в водной вытяжке сильно варьирует, тогда как в почвенных растворах во всём профиле он одинаковый. Только в поверхностном слое наблюдается преобладание солей кальция, что закономерно.

Таблица 3

Химизм засоления солонца глубокого малонатриевого в почвенных растворах и водных вытяжках

Глубина, см	Почвенные растворы		Водная вытяжка	
	По соотношению анионов	По соотношению катионов	По соотношению анионов	По соотношению катионов
0–25	Хлоридный	Кальциевый	Гидрокарбонатный	Кальциево-натриевый
30–40	Хлоридный	Магниево-натриевый	Хлоридный	Натриевый
42–52	Хлоридный	Магниево-натриевый	Сульфатно-хлоридный	Натриевый
52–62	Хлоридный	Магниево-натриевый	Сульфатно-хлоридный	Натриевый
65–75	Хлоридный	Магниево-натриевый	Хлоридно-сульфатный	Кальциево-натриевый
85–95	Хлоридный	Магниево-натриевый	Сульфатно-хлоридный	Натриевый
107–117	Хлоридный	Магниево-натриевый	Сульфатно-хлоридный	Магниево-натриевый
140–150	Хлоридный	Магниево-натриевый	Сульфатно-хлоридный	Натриевый
180–200	Хлоридный	Магниево-натриевый	Хлоридно-сульфатный	Натриево-кальциевый
250–270	Хлоридный	Магниево-натриевый	Сульфатно-хлоридный	Натриевый
360–370	Хлоридный	Магниево-натриевый	Сульфатно-хлоридный	Натриевый
420–450	Хлоридный	Магниево-натриевый	Сульфатно-хлоридный	Натриевый
500–520	Хлоридный	Магниево-натриевый	Сульфатно-хлоридный	Натриевый

В данном случае (табл. 3), при естественной влажности почвенный раствор относится по соотношению анионов к хлоридному, а по соотношению катионов – к магниево-натриевому типу.

Графическое представление ионного состава (рис. 3), полученное на основе химического анализа водных вытяжек и почвенных растворов, указывает на значительное различие между этими ионно-солевыми профилями.

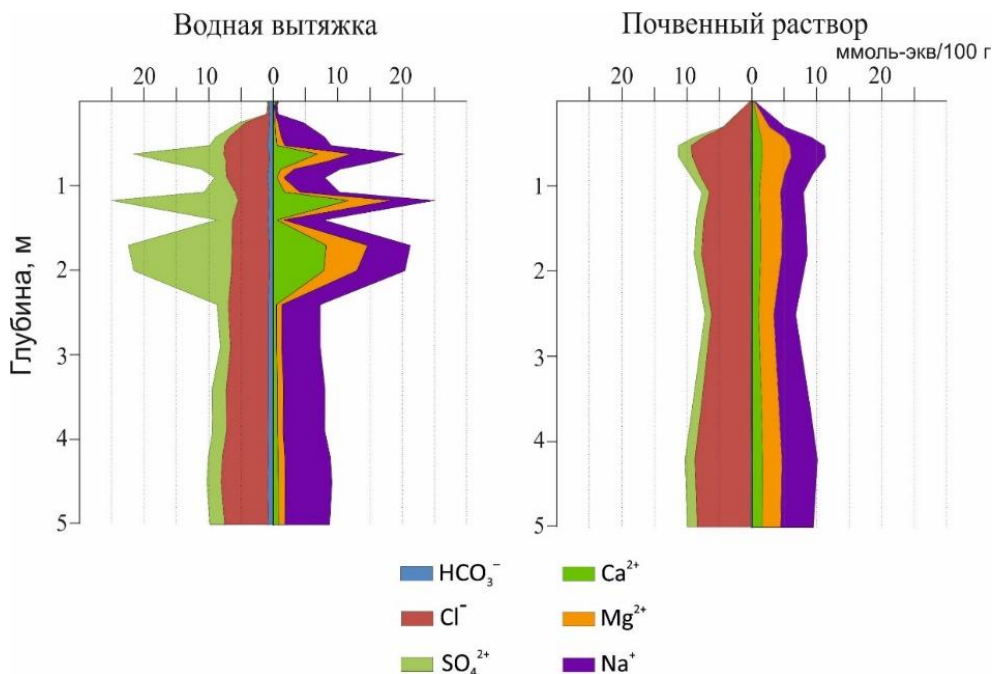


Рисунок 3. Ионно-солевой состав солонца глубокого по результатам водной вытяжки и почвенного раствора.

В других почвах на исследуемой территории (чернозёмы южные глубокосолончаковатые, солонцы средние средненатриевые черноземно-луговые, солонцы мелкие средненатриевые черноземно-луговые, солончаки типичные глубокопрофильные) наблюдаются те же закономерности в поведении ионов при увеличении влажности (рис. 4), характерные для солонца глубокого малонатриевого, описанного выше.

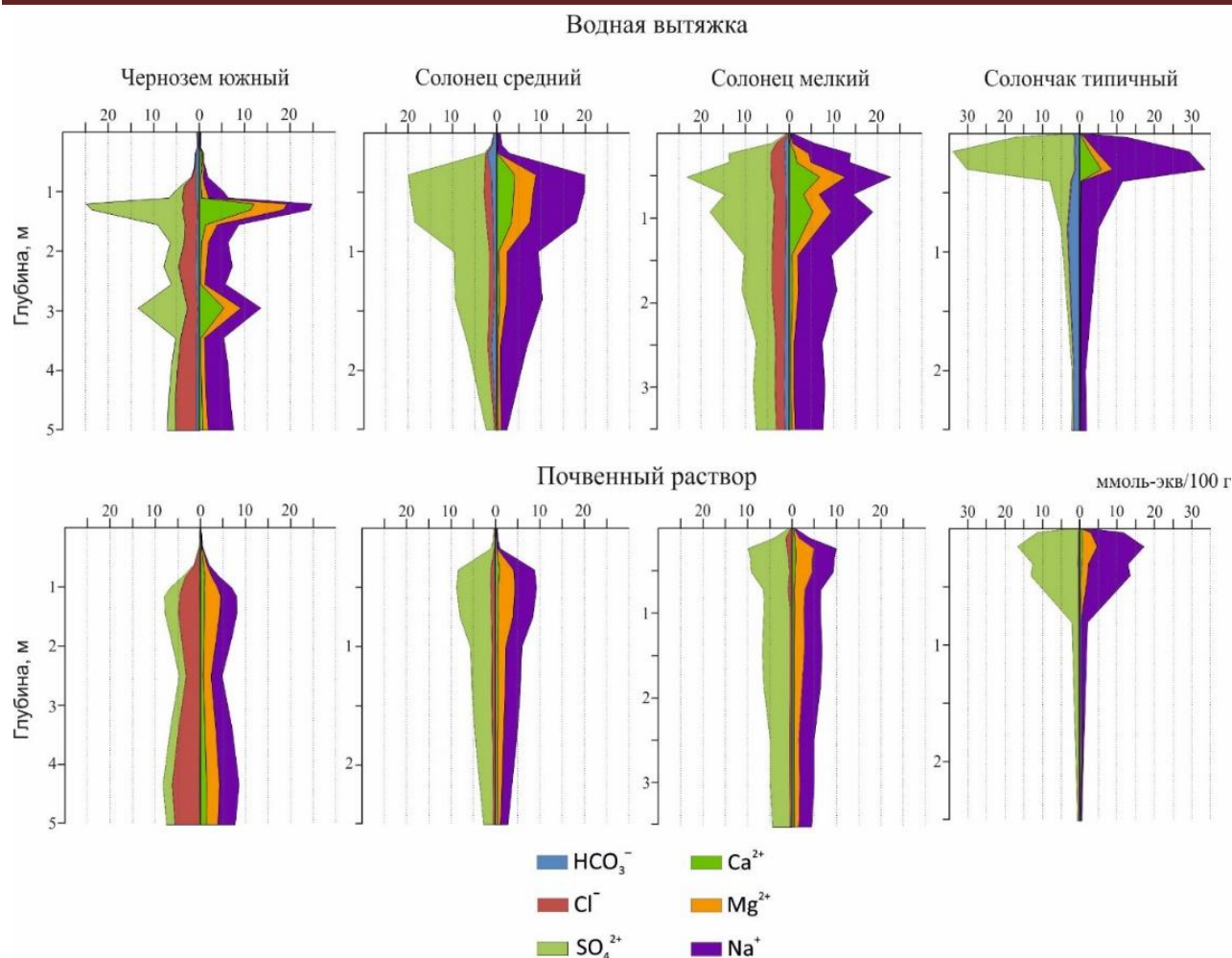


Рисунок 4. Ионно-солевой состав почв Ишимской степи по результатам водной вытяжки и почвенного раствора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследования позволяют заключить, что увеличение влажности приводит к изменению почвенного раствора по соотношению анионов в направлении сульфатного, а иссушение – в направлении хлоридного типа; по соотношению катионов при увеличении влажности – к натриевому, а при иссушении – к магниевому типу.

В климатическом плане на исследуемой территории сложилась несколько противоречивая ситуация. С одной стороны, фиксируется аридизация климата за счет общего тренда повышения среднегодовой температуры (Третий оценочный доклад ..., 2022), с другой, из-за массовой распашки и функционирования полезащитных лесополос отмечается повсеместный подъем грунтовых вод и, как следствие, увеличение влажности нижней части зоны аэрации почв (Кравцов, 2009; Кравцов, 2014; Кравцов, Смоленцева, 2022). Если эта тенденция сохранится, то можно ожидать в почвах Ишимской степи, где грунтовые воды залегают ниже критической глубины (для данной территории 3,9 м), сдвиг химизма засоления в сторону хлоридно-магниевоего типа и увеличение кристаллизации гипса в верхней части профиля. Напротив, в почвах гидроморфного ряда следует ожидать смещение химизма засоления в сторону сульфатно-натриевого типа, вследствие увеличения их влажности. Тяжелый гранулометрический состав этих почв и близкое к поверхности залегание грунтовых вод не дадут растворенному натрию покинуть почвенный профиль, что создает риск увеличения площади солонцовых почв.

Во избежание осолонцевания почв гидроморфного и полугидроморфного ряда рекомендуется провести мелиоративные мероприятия, направленные, прежде всего, на управление водным режимом территории – оптимизацию структуры лесополос посредством прореживания густых посадок для снижения их транспирационного воздействия на грунтовые воды, создание горизонтального дренажа для принудительного отвода грунтовых вод и понижения их уровня ниже критической отметки.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны А.А. Сенькову, идеи которого послужили основанием для данной работы.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-26-00104 (<https://rscf.ru/project/24-26-00104/>).

ЛИТЕРАТУРА

- Базилевич Н.И., Панкова Е.И. Опыт классификации почв по засолению // Почвоведение. 1968. № 11. С. 3–16.
- Базилевич Н.И., Панкова Е.И. Опыт классификации почв по содержанию токсичных солей и ионов // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 1972. Вып. 5. С. 36–40.
- Засоленные почвы России. Под ред. А.В. Соколова. Москва: ИКЦ «Академ-книга», 2006. 854 с.
- 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.
- Кравцов Ю.В. Подъем грунтовых вод в Ишимской степи // Сибирский экологический журнал. 2009. Том 16. № 2. С. 217–222.
- Кравцов Ю.В. Водный режим почв Ишимской степи / Министерство образования и науки РФ, Новосибирский государственный педагогический университет. Новосибирск: Новосибирский государственный педагогический университет, 2014. 252 с.
- Кравцов Ю.В. Факторы зимнего передвижения влаги в пахотных почвах Ишимской степи // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. 2024. Том 54. № 8. С. 113–121. <https://doi.org/10.26898/0370-8799-2024-8-12>
- Кравцов Ю.В., Смоленцева Е.Н. Особенности современного генезиса плакорных почв Ишимской степи // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2022. № 111. С. 116–156. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2022-111-116-156>
- Крюков П.А. Горные, почвенные и иловые растворы. Новосибирск: Наука 1971. 220 с.
- Минашина Н.Г. Токсичные соли в почвенном растворе, их расчет и классификация почв по степени засоления // Почвоведение. 1970. № 8. С. 92–105.
- Минеев В.Г. Практикум по агрохимии Москва: Издательство МГУ, 2001. 687 с.
- Муратова В.С., Маргулис В.Ю. Содержание токсичных солей в водных вытяжках и почвенных растворах гипсоносных почв Голодной степи // Почвоведение. 1971. № 12. С. 87–99.
- Панин П.С., Елизарова Т.Н., Шкаруба А.М. Генезис и мелиорация солонцов Барабы. Новосибирск: Наука. Сибирское отделение, 1977. 192 с.
- Панфилов В.П., Слесарев И.В., Кудряшова С.Я., Сеньков А.А. Современное гидрологическое состояние почв и подстилающих пород // Черноземы: свойства и особенности орошения / Ответственный за выпуск С.С. Трофимов; Институт почвоведения и агрохимии СО РАН. Новосибирск: Новосибирское отделение издательства «Наука», 1988. С. 47–57.
- Попов В.В. Зональные изменения почвенных растворов солонцовых почв Ишимской равнины. Диссертация ... канд. биол. наук. Новосибирск, 2019. 177 с.
- Попов В.В. Почвенный раствор и методы его изучения // Почвы и окружающая среда. 2020. Том 3. № 1. e106. <https://doi.org/10.31251/pos.v3i1.106>
- Попов В.В. Обзор результатов исследований почвенных растворов солонцовых почв // Почвы и окружающая среда. 2022. Том 5. № 4. e189. <https://doi.org/10.31251/pos.v5i4.189>
- Почвообразование и антропогенез: Структурно-функциональные аспекты / Ф.А. Факулин, А.В. Чичулин, А.А. Сеньков и др. Новосибирск: Наука. Сибирское отделение, 1991. 188 с.
- Сеньков А.А. Особенности засоления почв, подстилающих пород и грунтовых вод // Черноземы: свойства и особенности орошения / Под ред. И.М. Гаджиева. Новосибирск: Наука, 1988. 256 с.
- Сеньков А.А. Галогенез степных почв (на примере Ишимской равнины). Новосибирск: Издательство СО РАН, 2004. 152 с.
- Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / Е.М. Аментьева, А.М. Алейникова, Г.В. Алексеев [и др.]. Санкт-Петербург: Издательство «Наукоемкие технологии», 2022. 676 с.

Черноусенко Г.И., Панкова Е.И., Калинина Н.В., Убугунова В.И., Рухович Д.И., Убугунов В.Л., Цыремпилов Э.Г. Засоленные почвы Баргузинской котловины // Почвоведение 2017. № 6. С. 652–671. <https://doi.org/10.7868/Б0032180ХГ706003Х>

Шейн Е.В., Мазиров М.А., Зинченко С.И., Гончаров В.М., Корчагин А.А., Умарова А.Б., Милановский Е.Ю. Агрофизика. Владимир: Издательство ВНИИСХ, 2016. 124 с.

Bresler E., McNeal B.L., Carter D.L. Saline and Sodic Soils: Principles-Dynamics-Modeling. Springer Berlin Heidelberg, 1982. 236 p.

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.

Поступила в редакцию 21.07.2025

Принята 24.09.2025

Опубликована 29.09.2025

Сведения об авторах:

Попов Владимир Викторович – кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории географии и генезиса почв ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск, Россия); vik632288@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3859-1032>

Кравцов Юрий Васильевич – доктор биологических наук, доцент, профессор кафедры географии, регионоведения и туризма ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный педагогический университет» (г. Новосибирск, Россия); kravtsov60@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0462-9194>

Елизаров Николай Владимирович – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории географии и генезиса почв ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск, Россия); elizarov_89@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9647-3317>

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.



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

Salt composition transformation in the Ishim steppe soils with changes in their moisture

© 2025 V. V. Popov ¹, Yu. V. Kravtsov ², N. V. Elizarov ¹

¹Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Lavrentieva, 8/2, Novosibirsk, Russia. E-mail: vik632288@yandex.ru, elizarov_89@mail.ru

²Novosibirsk State Pedagogical University, st. Vilyuiskaya, 28, Novosibirsk, Russia. E-mail: kravtsov60@mail.ru

The aim of the study. To study the transformation of salt composition in the Ishim steppe soils as related with changes in their moisture content by comparing the chemical composition of the aqueous extract and soil solution under natural and increased moisture content.

Location of the study. The analysis was carried out with soil samples collected in the Ishim-Irtysh steppe interfluvium (Ishim steppe) within the Omsk region (Russia).

Methods. A comparative analytical method was used to compare the chemical composition of the aqueous extract, moistened soil solution and soil solution of natural moisture.

Results. The effect of moisture change on the ion-salt system of heavy loamy soils of the Ishim steppe was studied. With an increase in the soil moisture content the amount of dissolved salts in it invariably increased, which is associated with the solubility of both solid salts in soil and with the ongoing ion exchange processes. Such an increase is mainly due to the increased bicarbonate, sulfate and sodium concentrations. In gypsum-free samples, the decreased content of calcium and magnesium ions in the aqueous extract was observed, as compared with the soil solution. In gypsum-containing samples, on the contrary, an abrupt synchronous increase occurred not only in calcium and sulfate ions content, but also in magnesium in the aqueous extract. With an increase in soil moisture, a change in the ratio between individual ions occurred, significantly affecting the chemistry of salinization.

Conclusions. The increase in soil moisture was shown to shift the ratio of anions in the soil solution towards the sulfate, whereas soil drying shifted the ratio to the chloride type. As for the ratio of cations, increased soil moisture shifted it towards the sodium type and soil drying towards the magnesium type.

Keywords: Ishim steppe; soil solution; water extract; soil moisture; salt composition, salinization, ion-salt profile.

How to cite: Popov V.V., Kravtsov Yu.V., Elizarov N.V. Salt composition transformation in the Ishim steppe soils with changes in their moisture. *The Journal of Soils and Environment*. 2025. 8(3). e322. DOI: [10.31251/pos.v8i3.322](https://doi.org/10.31251/pos.v8i3.322) (in Russian with English abstract).

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors express their deep appreciation and heartfelt gratitude to A.A. Senkov, whose ideas served as the basis for this work.

FUNDING

The work was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation within the framework of scientific project No. 24-26-00104.

REFERENCES

- Bazilevich N.I., Pankova E.I. Experience in classifying soils by salinity. *Pochvovedenie*. 1968. No. 11. P. 3–16. (in Russian).
- Bazilevich N.I., Pankova E.I. Experience in classifying soils by the content of toxic salts and ions. *Dokuchaev Soil Bulletin*. 1972. Iss. 5. P. 36–40. (in Russian).
- Saline soils of Russia / A.V. Sokolov (ed.). Moscow: Akadem-kniga, 2006. 854 p. (in Russian).
- 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. Frieve. Moscow: Kolos Publ., 1977. 224 p. (in Russian).
- Kravtsov Yu.V. Lifting of subsoil waters in the Ishimskaya steppe. *Sibirskij Ekologicheskij Zhurnal*. 2009. Vol. 16. No. 2. P. 217–222. (in Russian).
- Kravtsov Yu.V. Water regime of soils of the Ishim steppe / Ministry of Education and Science of the Russian Federation, Novosibirsk State Pedagogical University. Novosibirsk: Novosibirsk State Pedagogical University Publishing House, 2014. 252 p. (in Russian).
- Kravtsov Yu.V. Factors of winter moisture movement in arable soils of the Ishim steppe. *Siberian Herald of Agricultural Science*. 2024. Vol. 54. No. 8. P. 113–121. (in Russian). <https://doi.org/10.26898/0370-8799-2024-8-12>
- Kravtsov Yu., Smolentseva E. Features of modern genesis of the Ishim steppe watershed plain soils. *Dokuchaev Soil Bulletin*. 2022. P. 116–156. (in Russian). <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2022-111-116-156>
- Kryukov P.A. Mountain, soil and silt solutions. Novosibirsk: Nauka Publ., 1971. 220 p. (in Russian).
- Minashina N.G. Toxic salts in soil solution, their calculation and classification of soils by the degree of salinization. *Pochvovedenie*. 1970. No. 8. P. 92–105. (in Russian).
- Mineev V.G. Agrochemistry Workshop Moscow: Moscow State University Publishing House, 2001. 687 p. (in Russian).
- Muratova V.S., Margulis V.Yu. Content of Toxic Salts in Aqueous Extracts and Soil Solutions of Gypsum-Bearing Soils of the Hungry Steppe. *Pochvovedenie*. 1971. No. 12. P. 87–99. (in Russian).
- Panin P.S., Elizarova T.N., Shkarupp A.M. Genesis and Melioration of Baraba Solonetz Soils. Novosibirsk: Nauka Publ. Siberian Branch, 1977. 192 p. (in Russian).
- Panfilov V.P., Slesarev I.V., Kudryashova S.Ya., Senkov A.A. Current hydrological state of soils and underlying rocks. In book: *Chernozems: properties and irrigation features* / Responsible for the release S.S. Trofimov; Institute of Soil Science and Agrochemistry SB RAS. Novosibirsk: Novosibirsk Branch of the Nauka Publishing House, 1988. P. 47–57. (in Russian).
- Popov V.V. Zonal changes in soil solutions of solonchic soils of the Ishim Plain. Dissertation ... Cand. Biol. Sci. Novosibirsk, 2019. 177 p. (in Russian).
- Popov V. V. Soil solution and methods of its investigation. *The Journal of Soils and Environment*. 2020. Vol. 3. No. 1. e106. (in Russian). <https://doi.org/10.31251/pos.v3i1.106>
- Popov V.V. Soil solution studies in solonchic soils: review of the results. *The Journal of Soils and Environment*. 2022. Vol. 5. No. 4. e189. (in Russian). <https://doi.org/10.31251/pos.v5i4.189>
- Soil formation and anthropogenesis: Structural and functional aspects / F.A. Fakulin, A.V. Chichulin, A.A. Senkov, et al. Novosibirsk: Nauka Publ. Siberian Branch, 1991. 188 p. (in Russian).
- Senkov A.A. Features of salinization of soils, underlying rocks and groundwater. In book: *Chernozems: properties and features of irrigation*. Ed. by I.M. Gadzhiev. Novosibirsk: Nauka Publ., 1988. 256 p. (in Russian).

Senkov A.A. Halogenesis of steppe soils (using the Ishim plain as an example). Novosibirsk: Publishing House of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2004. 152 p. (in Russian).

The third assessment report on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation / E.M. Akentieva, A.M. Aleynikova, G.V. Alekseev [et al.]. Saint Petersburg: Science-intensive Technologies Publishing House, 2022. 676 p. (in Russian).

Chernousenko G.I., Pankova E.I., Kalinina N.V., Rukhovich D.I., Ubugunova V.I., Ubugunov V.L., Tsyrempilov E.G. salt-affected soils of the Barguzin depression. Eurasian Soil Science. 2017. Vol. 50. No. 6. P. 646–663. <https://doi.org/10.1134/S1064229317060035>

Shein E.V., Mazirov M.A., Zinchenko S.I., Goncharov V.M., Korchagin A.A., Umarova A.B., Milanovsky E.Yu. Agrophysics. Vladimir: VNIISKH Publishing House, 2016. 124 p. (in Russian).

Bresler E., McNeal B.L., Carter D.L. Saline and Sodic Soils: Principles-Dynamics-Modeling. Springer Berlin Heidelberg, 1982. 236 p.

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.

Received 21 July 2025

Accepted 24 September 2025

Published 29 September 2025

About the authors:

Vladimir V. Popov – Candidate of Biological Sciences, Researcher at the Laboratory of Soil Geography and Genesis, Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); vik632288@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3859-1032>

Yuri V. Kravtsov – Doctor of Biological Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Geography, Regional Studies and Tourism, Novosibirsk State Pedagogical University (Novosibirsk, Russia); kravtsov60@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0462-9194>

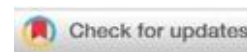
Nikolay V. Elizarov – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, Laboratory of Soil Geography and Genesis, Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; elizarov_89@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9647-3317>

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 631.445, 631.423.5, 631.413.3
<https://doi.org/10.31251/pos.v8i3.313>



Почвы Кучук-Кулундинских приозерных ландшафтов (Алтайский край): морфология, засоление, классификационное положение

© 2025 Ю. В. Симонова ¹, Г. А. Касаткина ², М. В. Чарыкова ¹, О. Р. Жунусова ¹

¹ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет», Университетская наб., 7–9, Санкт-Петербург, 199034, Россия. E-mail: uvsim@yandex.ru

²Центральный музей почвоведения имени В.В. Докучаева – филиал ФГБНУ ФИЦ «Почвенный институт имени В.В. Докучаева», Биржевой пр., 6, Санкт-Петербург, 199034, Россия. E-mail: kasatkina-galina@mail.ru

Цель исследования. Выявить особенности почвообразования приозерных Кучук-Кулундинских ландшафтов, выделив среди них общие провинциальные особенности и связанные с влиянием местных литолого-геоморфологических и геохимических условий.

Место и время проведения. Степная и сухостепная почвенная зона Западной Сибири, Кулундинская степь, Алтайский край. Полевые исследования проведены в 2020–2021 гг.

Методы. Изучались морфологические признаки (макро- и мезоуровень), важные для диагностики форм карбонатов, солонцового процесса и засоления, литологических особенностей почв. Определялись показатели засоления, обменные катионы, содержание карбонатов, органического вещества и гранулометрический состав.

Основные результаты. При обследовании почв Кучук-Кулундинских приозерных ландшафтов выявлено, что черноземы относятся к Предалтайской степной провинции, каштановые почвы – к Предалтайской сухостепной провинции, солончаки формируются в дельтах рек, понижениях с близко залегающими грунтовыми водами. Почвы сформированы на слоистых озерно-аллювиальных отложениях с высокой долей пылеватой фракции в гранулометрическом составе и неоднородностями по содержанию песчаной фракции. Характерными чертами черноземов является малая мощность гумусовых горизонтов и преобладание дисперсных форм карбонатов. Это подтверждает ряд литературных данных о морфологическом строении западносибирских черноземов. В каштановых почвах на террасах котловин озер Кучук и Кулундинское хорошо оформленные карбонатные новообразования в виде белоглазки отсутствуют, распространены формы карбонатных новообразований в виде пропитки и расплывчатых пятен. Черноземы и каштановые почвы Кучук-Кулундинских ландшафтов относятся к солонцеватым и засоленным подтипам с сильной и очень сильной степенью засоления. Солевой профиль срединно-аккумулятивного вида; в ионно-солевом составе преобладают сульфаты и натрия. В химизме засоления черноземов сильнее, чем в каштановых почвах, выражено участие соды. В солонцеватых почвах очень высока доля поглощенного натрия и магния. Почвы под лесополосами имеют более высокое содержание органического вещества, глубже выщелочены от карбонатов и практически не содержат легкорастворимых солей.

Заключение. Провинциальными особенностями почв является маломощный гумусовый профиль и дисперсные формы карбонатных новообразований. Влияние геоморфологических и литолого-геохимических условий приозерных ландшафтов заключается в распространении засоленных и солонцеватых разностей. Высокая карбонатность, засоление, литологическая слоистость и специфика гидротермического режима глубоко промерзающих почв определяют структуру срединных и нижних горизонтов профиля. Под лесозащитными полосами формируются черноземы глинисто-иллювиальные оподзоленные, незасоленные и значительно выщелоченные от карбонатов.

Ключевые слова: Кулундинская степь; черноземы южные; черноземы дисперсно-карбонатные; каштановые почвы; черноземы оподзоленные; пропиточные карбонаты; лесополосы.

Цитирование: Симонова Ю. В., Касаткина Г. А., Чарыкова М. В., Жунусова О. Р. Почвы Кучук-Кулундинских приозерных ландшафтов (Алтайский край): морфология, засоление, классификационное положение // Почвы и окружающая среда. 2025. Том 8. № 3. е313. DOI: [10.31251/pos.v8i3.313](https://doi.org/10.31251/pos.v8i3.313)

ВВЕДЕНИЕ

Изучению засоленных почв Кулундинской степи посвящены многочисленные работы (Герасимов, Иванова, 1934; Ковда, 1946; Почвы Алтайского края, 1959; Базилевич, 1965; Почвы Кулундинской степи, 1967; Курачев, Рябова, 1981; Казанцев, 1990; Засоленные почвы ..., 2006). Алтайский край занимает лидирующее положение среди субъектов Сибирского федерального округа по площади пахотных земель, поскольку обладает большими ресурсами плодородных почв. Однако почвы здесь подвержены деградационным процессам как и многие другие аридные земли – засолению,

осолонцеванию, дефляции (Meyer et al., 2008); поэтому в научной литературе большое внимание уделялось вопросам их мелиорации и повышения плодородия. Вместе с тем, с точки зрения субстантивно-генетического подхода и анализа провинциальных особенностей юга Западной Сибири, влияющих на классификационное положение, почвы Кулунды изучены недостаточно, а современное разнообразие почв в печати отражено слабо (Смоленцев и др., 2010; Смоленцева, 2020; Кравцов, Смоленцева, 2022). Территории же приозерных равнин менее других использовались в сельском хозяйстве и поэтому изучены в еще меньшей степени (Королюк и др., 2008).

О том, что Кулунда является областью активного соленакопления говорит наличие множества соленых и горько-соленых озер с минерализацией от 1 до 430 г/л (Колпакова и др., 2015). В ряде озер имеются богатые месторождения солей: соды (озера системы Танатар), гипса (озеро Жира), поваренной соли (озеро Бурлинское), мирабилита (озеро Кучукское). Наличие солей в количестве свыше 300 г/л в ряде озер Кулунды свидетельствует об отсутствии оттока из растворов соляных озер (Ковда, 1946).

Озера Кучук и Кулундинское питаются за счет рек Суетка, Кулунда и Кучук, представляя собой наиболее пониженную в рельефе область аккумуляции стока. Кучук-Кулундинская озерно-бассейновая система является крупнейшей на юге Западной Сибири и имеет площадь 24100 км² (Булатов и др., 2005); этот бассейн включает в себя более 5000 озер.

В то время как повышенные и хорошо дренированные водораздельные пространства Кулундинской степи характеризуются однотипным почвенным покровом с господством черноземов и каштановых почв, озерно-аллювиальные равнины, древние ложбины стока и их дельты отличаются преобладанием сложных сочетаний и комплексов полугидроморфных и гидроморфных почв с солонцами и солончаками (Почвы Кулундинской степи, 1967; Засоленные почвы ..., 2006).

Разнообразие почв приозерных ландшафтов Кучук-Кулундинской системы определяется ее положением на границе двух почвенных зон – зоны обыкновенных и южных черноземов степи (Предалтайской степной провинции) и зоны темно-каштановых почв сухой степи (Предалтайской сухостепной провинции) (Цифровая версия ..., 2019). При этом неоднородность почвенного и растительного покрова равнин Кучук-Кулундинской озерной системы усиливается за счет различий в гидрохимическом режиме (Королюк и др., 2008), обусловленных рельефом, литологией, перераспределением солей в пределах бессточной области.

Целью настоящей работы было выявить особенности почвообразования приозерных Кучук-Кулундинских ландшафтов. В задачи исследования входило: определить морфологические признаки и показатели почвенных свойств, важные для установления классификационного положения, оценить провинциальные особенности и основные факторы дифференциации почв.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Территория исследования. Район исследования расположен на территории Алтайского края в центральной части Кулундинской степи, на юге Обь-Иртышского междуречья (рис. 1). Озера Кучук и Кулундинское являются частью одной системы и связаны протокой, естественный сток по которой нарушен. При этом чаша озера Кучук приурочена к максимально опущенной части Кулундинской впадины.

Химический анализ воды, выполненный нами летом 2021 г. показал (табл. 1), что по сравнению с Кулундинским озером, которое относится к озерам транзитного стока, озеро Кучук обладает значительно более высокой минерализацией. По общему содержанию солей Кулундинское озеро относится к рассолам (> 100 г/л), озеро Кучук – к сверхкрепким рассолам (> 300 г/л). Последнее является крупнейшим в Западной Сибири месторождением мирабилита.

Таблица 1

Химический состав рассолов озер Кучук-Кулундинской системы

Точка отбора	pH	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Минерализация
		г/л								
Оз. Кучук, авг. 2021 г.	7,2	0,0	0,7	161,7	51,7	0,2	13,2	82,2	0,7	311
Оз. Кулундинское, авг. 2021 г.	8,2	0,4	1,5	53,6	26,9	0,1	5,0	32,6	0,6	121

В макрокомпонентном составе обоих озер преобладают хлориды, сульфаты и натрий (см. табл. 1). По классификации Курнакова-Валяшко (Валяшко, 1962) оба озера относятся к сульфатному гидрохимическому типу.

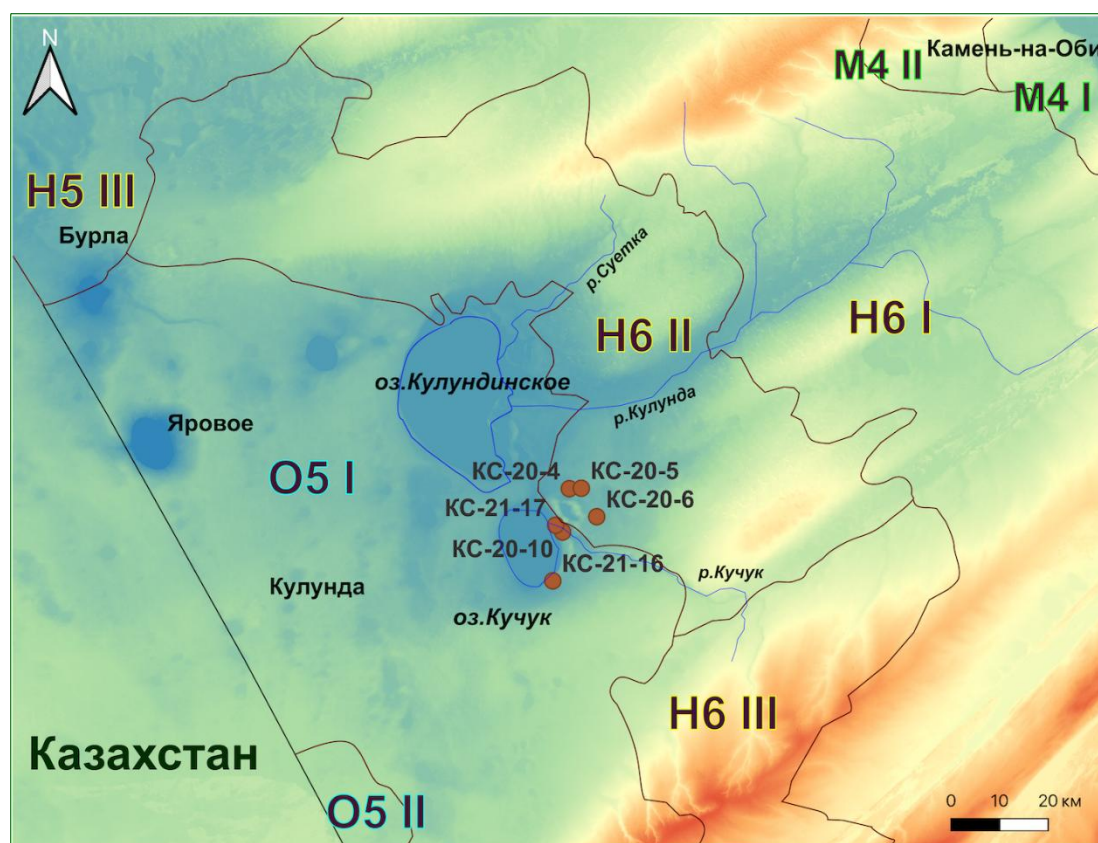


Рисунок 1. Схема расположения объектов исследования на основе цифровой модели рельефа в QGIS с подложкой из космоснимков высокого разрешения. На карте нанесены площадки с почвенными разрезами и границы почвенных провинций и округов (Цифровая версия ..., 2019): М4 I – Предалтайская лесостепная провинция, Верхнеобский округ; М4 II – Предалтайская лесостепная провинция, Бийско-Чумышский округ; Н5 III – Западно-Сибирская степная провинция, Карасукский округ; Н6 I – Предалтайская степная провинция, Кулундинско-Алейский округ; Н6 II – Предалтайская степная провинция, Бурла-Кучукский округ; Н6 III – Предалтайская степная провинция, Алейский округ; О5 I – Предалтайская сухостепная провинция, Кулундинский округ; О5 II – Предалтайская сухостепная провинция, Михайловский округ.

Отбор почвенных проб был выполнен в июле 2020 г. и августе 2021 г. Три разреза были заложены на территории приводораздельного пространства: КС-20-4 (52°48'19" с.ш., 79°55'48" в.д.), КС-20-5 (52°48'19" с.ш., 79°55'50" в.д.), КС-20-6 (52°45'11" с.ш., 79°58'44" в.д.). Два разреза КС-20-10 (52°44'6" с.ш., 79°51'13" в.д.) и КС-21-16 (52°37'59" с.ш., 79°50'53" в.д.) были заложены на террасах озер Кучук и Кулундинское, разрез КС-21-17 (52°44'10" с.ш., 79°51'13" в.д.) – в дельте р. Кучук (рис. 2).

Климат. Средняя годовая температура Центральной Кулунды (по данным метеостанции Славгород) составляет 2,0° С. По сравнению с Алтайским краем район исследования характеризуется более высокими летними температурами и наибольшей теплообеспеченностью. Температура самого теплого месяца (июль) составляет 20,8 °С, сумма активных температур – 2400° С (Харламова, 2013).

В Кулундинской степи выпадает меньше всего осадков по Алтаю – 250–300 мм в год, из которых до 70% влаги приходится на теплый период (с апреля по октябрь). Продолжительность периода без дождей также наибольшая по краю – от 80 до 100 дней. Гидротермический коэффициент равен 0,4–0,5 (Славгород, Рубцовск) (Харламова, 2013).

В зимнее время в районе наибольшего понижения Кулундинской впадины фиксируются одни из самых низких зимних температур по сравнению со всей равнинной частью Алтайского края. Температура самого холодного месяца (январь) составляет –18,9° С. Здесь же, в районе Центральной Кулунды, отмечается наибольшая суровость зимы, которая оценивается по сумме температур ниже –15° С. Сумма температур ниже –15° С составляет 1640° С (Харламова, 2013). При этом высота снежного покрова степной Кулунды наименьшая по сравнению с остальной частью Алтайского края и составляет 20–25 см (Харламова, Казарцева, 2017).

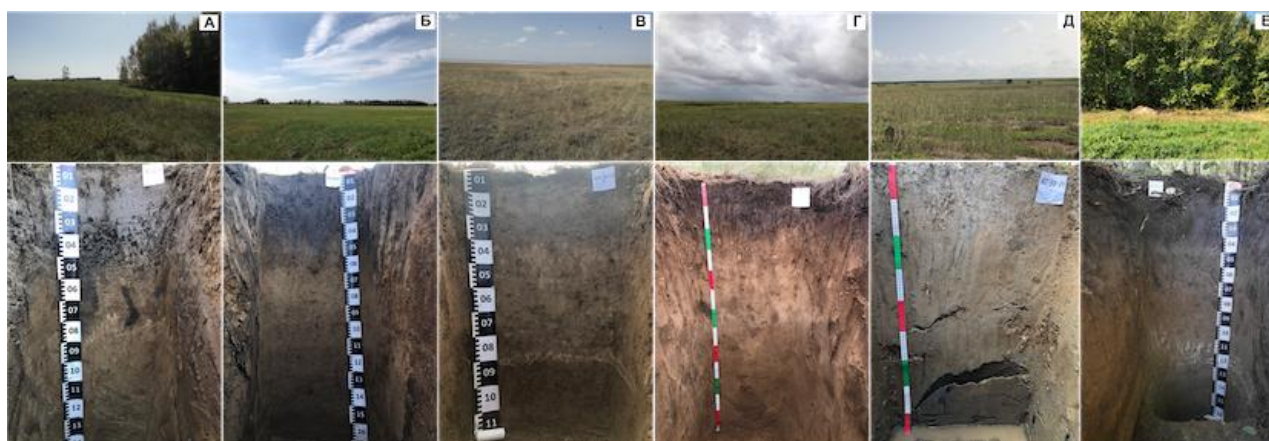


Рисунок 2. Площадки мест заложения разрезов и профили почв: А – разрез КС-20-5, чернозем под залежью (солodka, полынь); Б – разрез КС-20-6, чернозем под косимой залежью (солонечниково-типчаковая степь); В – разрез КС-20-10, каштановая почва под галофитной степью; Г – разрез КС-21-16, каштановая почва под типчаковой степью; Д – разрез КС-21-17, солончак под лебедово-тростниковой растительностью; Е – разрез КС-20-4, чернозем под лесополосой из тополевого.

Низкие зимние температуры и малоснежность приводят к глубокому и длительному промерзанию почв. В целом для Кулундинской степи глубина промерзания варьирует от 1,6 до 3,2 м (Почвы Кулундинской степи, 1967), в районе Кулундинского озера – от 1,5 до 2,0 м (Харламова, 2013).

Таким образом, для Центральной Кулунды характерна высокая амплитуда колебаний температуры в течение года. В летний период температура поверхностных слоев почвы здесь может достигать значений свыше 60°C , а зимой может опускаться до -54°C . Вследствие такого контраста летних и зимних температур ранее климат Кулунды в основном характеризовался как резко континентальный; однако в современных публикациях это мнение не поддерживается, климат Алтайского края, за исключением отдельных территорий, характеризуется как умеренный континентальный (Харламова, 2013).

Начиная с 1990-х гг. в пределах Кулундинской равнины и Приобского плато отмечается значительное потепление климата. Ухудшилась динамика неблагоприятных природных явлений: увеличилось число дней с суховеино-засушливой погодой и число пыльных бурь. Нарастание сумм тепла, как и сокращение теплообеспеченности летом происходит быстрее и энергичнее, чем аналогичные процессы зимой. Увеличивается количество и продолжительность периодов без дождей, а выпадающие осадки, имея ливневый характер, слабо пополняют запасы почвенной влаги (Харламова, 2013).

Почвообразующие породы. Кулундинская равнина, сформированная в результате тектонического опускания земной коры, сложена толщами палеогеновых, неогеновых и четвертичных морских отложений, засоленных остаточными солями морского состава и гипсом. С поверхности она перекрыта плащом четвертичных отложений и слабо дренирована сетью неглубоко врезанных речных систем (Боровский, 1978).

Обширное Приобское плато грядово-увалистых возвышенностей сложено преимущественно лессовидными суглинками, которые подстилаются слоистой песчано-глинистой толщей. Широкие и глубокие ложбины древнего стока Приобского плато выполнены песками, подстилаемыми на небольшой глубине песчано-глинистыми отложениями (Почвы Кулундинской степи, 1967).

Верхнечетвертичная толща Кулунды представлена пылеватыми супесями, глинистыми песками и лессовидными суглинками, возникшими в результате переэвентации аллювиальных наносов древних рек, пески которых прошли стадию эолового переотложения. Широкая плоская терраса Кучук-Кулундинской озерной котловины сложена комплексом озерно-аллювиальных отложений (карасукская свита): суглинки, супеси, глины, прослойки мергелей, пески (Почвы Кулундинской степи, 1967; Государственная геологическая карта ..., 2015).

Почвенно-географическое районирование. В районе Кучук-Кулундинской системы озер проходит граница двух почвенных зон (см. рис. 1). В пределах степной зоны почвы относятся к Предалтайской степной провинции (Н6), Бурла-Кучукскому округу (Н6 II) черноземов южных среднетяжелых мало- и среднетяжелых, черноземов солонцеватых и лугово-черноземных

солонцеватых и солончаковатых среднесуглинистых почв (Урусевская и др., 2020). Территория провинции имеет равнинный облик, на фоне которого выделяется Приобское лессовое плато и ложбины древнего стока (Добровольский, Урусевская, 2006). Рельеф округа относится к плоским, плоско- и гивно-волнистым озерно-аллювиальным равнинам.

Почвы сухостепной почвенной зоны относятся к Предалтайской сухостепной провинции (О5), Кулундинскому округу (О5 I) темно-каштановых и каштановых почв с участием солонцов луговых суглинистых песчаных, подстилаемых песчаными и супесчаными породами, на озерно-аллювиальных отложениях (Урусевская и др., 2020).

Методы исследования. Морфологический анализ почв проведен при полевом обследовании профилей и более детально (на мезоуровне) при обследовании образцов почв с помощью цифрового комплекса визуализации МС-АФ (Россия).

Химический анализ почв выполнен общепринятыми методами. Содержание органического вещества (C_{org}) определяли по методу Тюрина; CO_2 карбонатов – гравиметрическим методом по изменению массы навески в результате обработки 5 н. HCl (Растворова и др., 1995); состав обменных оснований – методом Пфедффера в модификации Молодцова и Игнатовой с комплексонометрическим окончанием для Ca^{2+} и Mg^{2+} и пламенно-фотометрическим окончанием для Na^+ (Воробьева, 1998).

Состав солей определяли стандартными методами в водной вытяжке при соотношении почва и вода 1:5 (Воробьева, 1998). Концентрации Na^+ и K^+ измеряли на анализаторе ICPE-9000 методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой. Гранулометрический состав почв определяли пипет-методом с пирофосфатной обработкой (Растворова, 1983).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Особенности макро- и мезоморфологического строения. По сравнению с черноземами Русской равнины западносибирские черноземы имеют более короткий гумусовый профиль до 40–45 см (см. рис. 2 А, Б, Е). Глубокое промерзание, замерзание почв до покрытия снегом либо при малой его толщине, их позднее оттаивание и неглубокое промачивание приводит к растрескиванию почв. Результатом таких условий промерзания и промачивания являются языковатость гумусового горизонта (Горшенин, 1955). Вместе с резким летним иссушением эти условия способствуют тому, что время активной биологической деятельности сокращается, а корни растительности сосредоточены близко к поверхности, поэтому почва обладает невысокой степенью гумусированности и малой мощностью гумусовой толщи (Семина, Вередченко, 1962).

Верхние гумусовые горизонты черноземов имеют крупнокомковатую, комковато-ореховатую и комковато-мелкоглыбистую структуру (рис. 3 А). В нижней части гумусовой толщи хорошо заметны признаки солонцеватости: высокая плотность, компактность, ореховато-призматическая структура и темные кутаны (рис. 3 Б, В). О солонцеватости черноземов южных Западно-Сибирской равнины хорошо известно из литературы (Герасимов и др., 1963).

В каштановых почвах, как в почвах более ксероморфного типа, мощность гумусового горизонта сокращается до 10 см. Структура горизонта АJ мелкоглыбистая и отличается более светлой окраской с коричневым оттенком (рис. 3 Г).

Карбонатные новообразования черноземов представлены диффузными формами – пропитка и пятна. В горизонтах, переходных к породе, наблюдаются субгоризонтальные и субвертикальные карбонатные полосы (см. рис. 2 В, Е), свидетельствующие о колебаниях глубины промачивания.

На уровне мезоморфологии хорошо видны дисперсные и миграционные формы карбонатов – скопления мучнистого кальцита, прожилки-тяги (рис. 4 А), пропитка и пятна (рис. 4 Б), околоторовая сегрегация (рис. 4 В), выпоты-налеты (рис. 4 Г), редкие карбонатные кутаны по порам и на щебне (рис. 4 Д).

Каштановые почвы Кучук-Кулундинской системы озер характеризуются не только маломощным гумусовым горизонтом, но и более высокой границей вскипания (около 30 см). Морфология новообразований аккумулятивно-карбонатного горизонта каштановых почв отличается от наблюдаемых в черноземах несколько лучшей сегрегированностью. На фоне пропиточных форм выделяются рыхлые округлые формы, более и менее объемные (рис. 4 Е). Однако первые встречаются реже. Они представляют собой округлые новообразования (15 мм) с рыхлой оболочкой и ядром около 5 мм. В данном случае горизонту САТ каштановых почв больше соответствует предложенный ему на замену Н.Б. Хитровым и М.И. Герасимовой (Хитров, Герасимова, 2021) горизонт ВСА, дополненный признаками dc и nc .

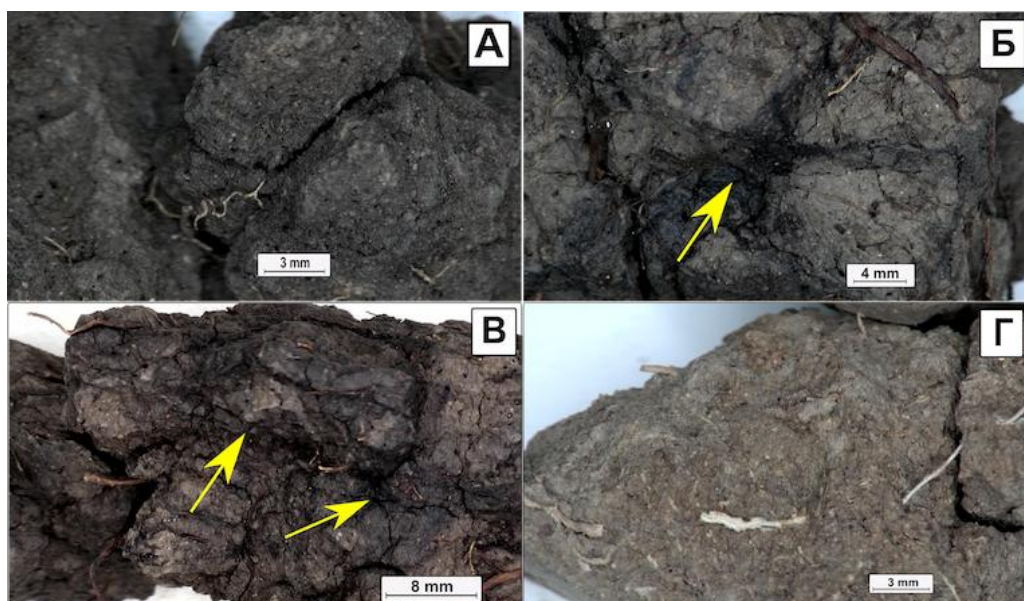


Рисунок 3. Детали морфологического строения гумусовых горизонтов почв: (А) глыбистая структура, АУра (0–10 см) р. КС-20-6; (Б) и (В) гумусовые кутаны (отмечены стрелками) по поверхностям агрегатов, АУsn (25–43 см) р. КС-20-5; (Г) глыбистая структура, коричневатая окраска, АJ (0–10 см) р. КС-21-16.

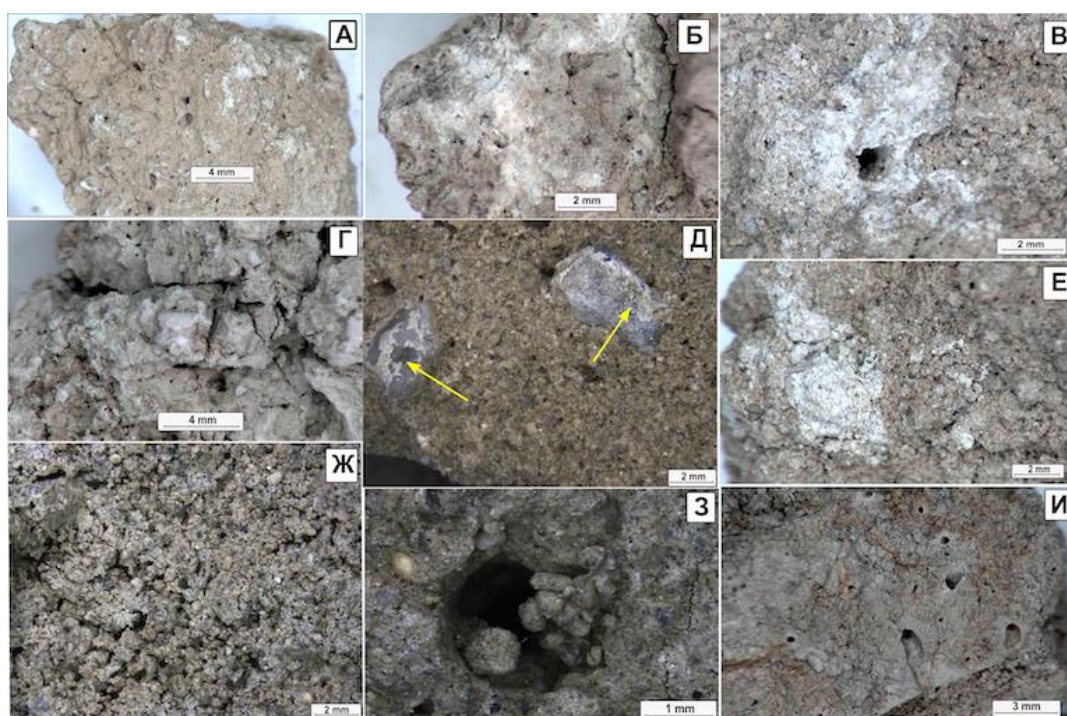


Рисунок 4. Детали морфологического строения почв: (А) поры, мучнистые карбонатные тяжи, ВСAdc,s (105–115 см) р. КС-20-5; (Б) поры, карбонатные пропиточные пятна, ВСAdc,s (105–115 см) р. КС-20-5; (В) околопоровая сегрегация карбонатов, САТs (25–35 см) р. КС-21-16; (Г) карбонатная пропитка и налеты, Сса,s (135–155 см), р. КС-20-5; (Д) карбонатные кутаны на поверхности дресвы, 2Сса2 (110–130 см) р. КС-21-16; (Е) мучнистые карбонатные пятна, САТ (25–35 см) р. КС-21-16; (Ж) творожисто-коагуляционная структура, Сса,s (125–135 см) р. КС-20-6; (З) копролиты, ВСAdc,s (90–100 см) р. КС-20-6; (И) творожистая структура, поры, ожелезнение на карбонатном фоне, Сса,s (90–110 см) р. КС-20-10.

Особенностью карбонатных горизонтов, включая почвообразующую породу как черноземов, так и каштановых почв, является наличие солей, губчатое и творожистое строение, обилие биогенных пор, копролитов, газовых пор и пустот растворения (рис. 4 Д–И).

Контрастным компонентом почвенного покрова являются почвы, расположенные под поλεзащитными лесными полосами. Их гумусовая толща значительно более дифференцирована (см. рис. 2 Е). Верхние гумусовые горизонты комковатой и комковато-ореховатой структуры с элементами угловатости (рис. 5 А, Б). В нижней части структура становится призмовидной, появляются признаки оподзоливания (см. рис. 2 Е; 5 В).

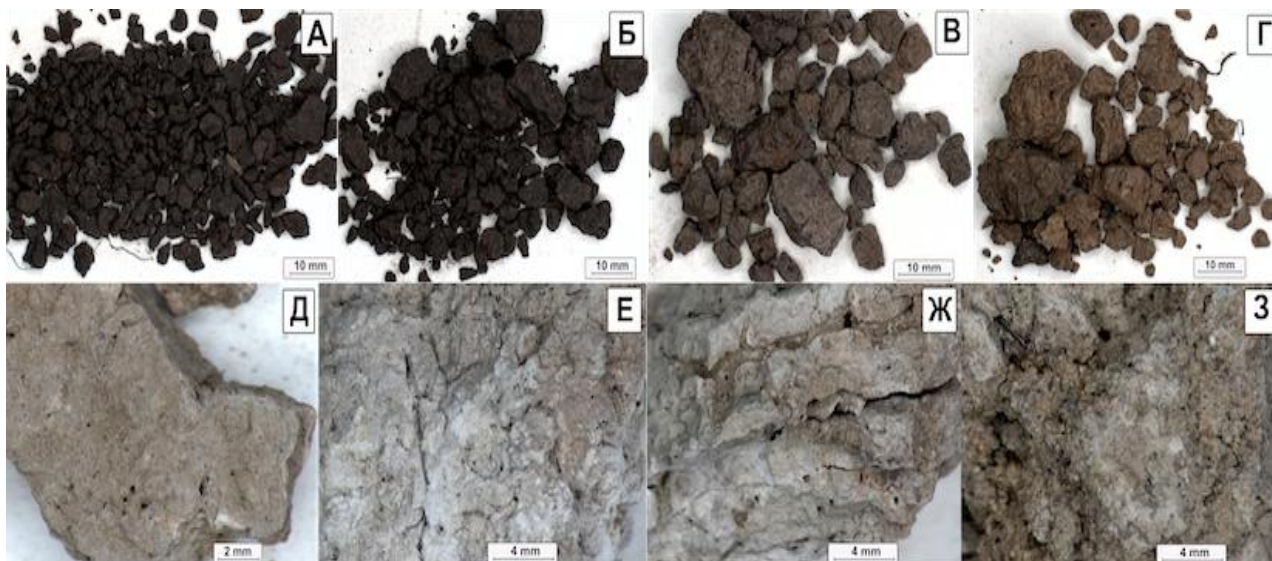


Рисунок 5. Детали морфологического строения почв под лесозащитной полосой (разрез КС-20-4): (А) комковатая структура, АU1 (0–8 см); (Б) комковато-ореховатая структура, АU2 (15–25 см); (В) призмовидная структура оподзоленной части гумусового горизонта, тонкие железистые прожилки по ходам корней, АUe (33–42 см); (Г) призмовидная структура, ВI (45–65 см); (Д) карбонатная пропитка и прожилки, поры чистые, ВCAdc1 (85–95 см); (Е) карбонатные налеты, ВCAdc2 (100–120 см); (Ж) плитчатая структура, поры, карбонатные налеты, Сса (130–150 см); (3) опесчаненный слой породы с карбонатной пропиткой, 2Сса (150–160 см).

Между гумусовым и карбонатным горизонтом выщелоченная толща мощностью около 40 см. Горизонт выщелачивания имеет призмовидную структуру (рис. 5 Г) и слабые глинистые кутаны, свидетельствующие об иллювиировании глины.

Для аккумулятивно-карбонатных горизонтов и почвообразующей породы характерны дисперсные формы карбонатов и тонкие поры (рис. 5 Д–Ж), подобные тем, что встречались в рассмотренных выше черноземах. В горизонтах породы структура становится плитчатой (см. рис. 5 Ж), что обусловлено озерно-аллювиальным генезисом отложений, а с глубины 150 см происходит литологическая смена на значительно более опесчаненную толщу, также пропитанную карбонатами (рис. 5 3).

Гранулометрический состав. Отложения, на которых сформированы черноземы, занимающие приводораздельные пространства, имеют тяжелый гранулометрический состав (средне- и тяжелосуглинистый) с содержанием физической глины от 35 до 50% (рис. 6 А, Б).

Верхняя часть отложений более однородна. В гранулометрическом составе высока доля крупной пыли (20–30%), ила (более 20%) и мелкого песка (более 20%). Вместе с тем, наличие заметного количества крупнопесчаной фракции не позволяет отнести их к лессовидным суглинкам. Наличие высокой доли крупной пыли связано, по всей видимости, с перевеянностью отложений и поступлением материала с окружающих с севера и востока поверхностей Приобской равнины, сложенной лессоидами (Государственная геологическая карта ..., 2015).

В нижней части обнаруживается слоистость с включением прослоев с высоким содержанием крупного и мелкого песка (40–50%) и наличием скелетной части (1–3%), что прямо указывает на их озерно-аллювиальное происхождение.

Каштановые почвы, расположенные на террасах, так же как и черноземы имеют средне- и тяжелосуглинистый состав. Спецификой озерно-аллювиальных отложений, слагающих террасы, является лучшая сортированность и перемытость материала, более высокая доля песка и меньшая доля крупной пыли, смена контрастных по гранулометрическому составу слоев (рис. 6 В).

Распределение фракции ила по профилю черноземов относительно равномерное, с некоторым накоплением в средней части чернозема под лесополосой (см. рис. 6 А) и в нижней части гумусовых горизонтов черноземов с признаками солонцеватости (см. рис. 6 Б). У каштановых почв накопление ила заметно в горизонте ВМКsn (см. рис. 6 В).

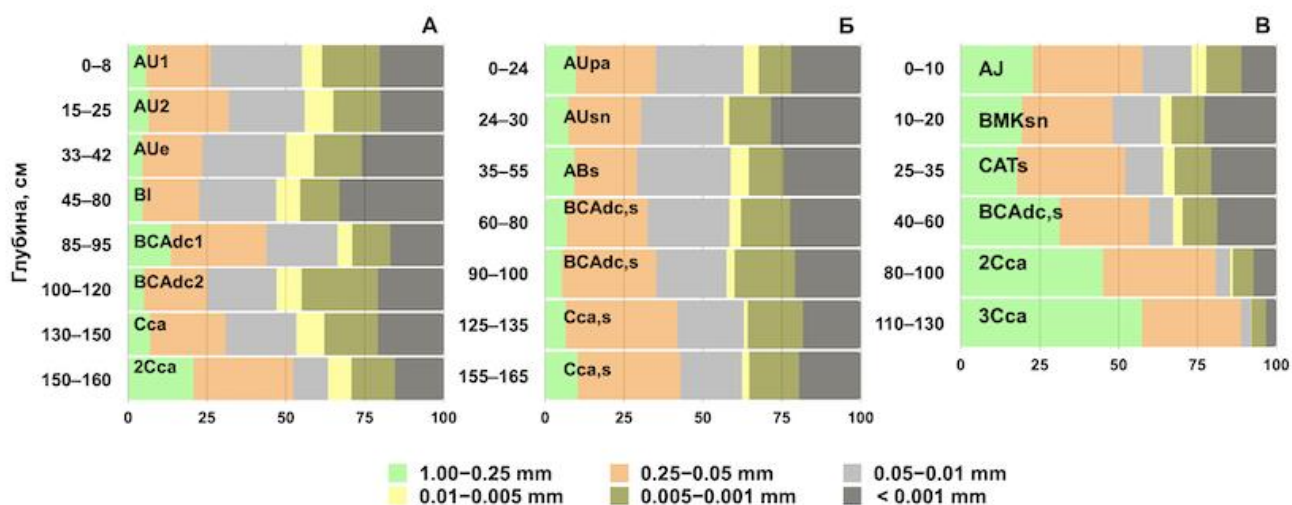


Рисунок 6. Гранулометрический состав: (А) чернозема под лесополосой (разрез КС-20-4); (Б) чернозема под косой залежью (разрез КС-20-6); (В) каштановой почвы (разрез КС-21-16).

Содержание органического вещества. Невысокое содержание $C_{орг}$ (от 1,5 до 2,4%) в изученных нами черноземах (разрез КС-20-5, КС-20-6) типично для черноземов южных западносибирских (табл. 2).

По содержанию $C_{орг}$ исследованные черноземы, расположенные на приводораздельном пространстве, относятся к виду мало- и среднегумусированных (Классификация ..., 2004).

В каштановых почвах сухой степи содержание $C_{орг}$ не превышает 1,5% (см. табл. 2).

Изученная нами почва под лесополосой из тополельника (разрез КС-20-4) отличалась более высоким по сравнению с остальными почвами содержанием $C_{орг}$ (до 3%).

Карбонатный профиль. Содержание карбонатов во всех почвах высокое (10–20%). В вертикальном распределении карбонатов имеются как внутривертикальные максимумы, так и варианты нарастания карбонатности с глубиной, с максимумом в почвообразующей породе (см. табл. 2). В последнем случае аккумулятивно-карбонатный горизонт выделяется по наличию морфологически более выраженных форм карбонатов по сравнению с породой, хотя в случае дисперсных карбонатных образований четкое выделение аккумулятивно-карбонатного горизонта затруднено.

Максимум карбонатов в верхнем горизонте был отмечен только у солончака (разрез КС-21-17) в дельте р. Кучук (см. табл. 2), что указывает на его окарбоначивание в условиях испарительного режима.

Чернозем под лесополосой (разрез КС-20-4) выделяется наиболее высоким содержанием карбонатов среди остальных почв, однако карбонатный горизонт залегает значительно глубже. Мощность выщелоченной толщи достигает 80 см (см. табл. 2).

Катионообменные свойства. Сумма обменных оснований у черноземов и каштановых почв составляет от 20 до 30 смоль(+)/кг почвы (см. табл. 2). Среди оснований преобладают кальций и магний. В то же время доля обменного натрия в гумусовых горизонтах черноземов и каштановой почвы (разрез КС-21-16) высока и превышает 10% от суммы оснований. Высокая доля обменного натрия, щелочная и сильнощелочная реакция среды (см. табл. 2), морфологические признаки горизонтов – высокая плотность, потечность гумуса, призматическая структура, относят черноземы и каштановую почву к солонцеватым подтипам.

По-видимому, проявление солонцеватости связано не только с присутствием обменного натрия в почвенном поглощающем комплексе (ППК). В отдельных работах было показано, что высокое содержание обменного магния способно еще более усиливать пептизирующее действие натрия (Хитров, 2004). Так, в изученных нами солонцеватых черноземах и каштановой почве доля обменного магния в ППК высокая и превышает долю кальция.

Таблица 2

Величины pH, содержание гумуса и карбонатов, состав обменных катионов

Горизонт	Глубина, см	С _{орг}	Карб.	pH	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺
		%			смоль(+)/кг почвы			% от суммы обменных оснований		
КС-20-5 Чернозем дисперсно-карбонатный солонцеватый засоленный маломощный среднесуглинистый Tonguic Protocalcic Chernozem (Loamic, Humic, Salic, Sodic)*										
AUpa	0–25	2,37	отс.	7,0	14,0	9,6	3,0	53	36	11
AUsn	25–40	1,68	отс.	8,8	10,0	11,6	4,5	38	45	17
ABdc,s	45–65	0,48	2,1	8,9	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о
BCAdc,s	80–100	н/о	12,0	9,4	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о
BCAdc,s	105–115	н/о	13,7	9,1	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о
Cca,s	135–155	н/о	24,2	8,6	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о
КС-20-6 Чернозем дисперсно-карбонатный солонцеватый засоленный среднемощный легкосуглинистый Tonguic Protocalcic Chernozem (Loamic, Humic, Salic, Sodic)*										
AUpa	0–24	1,61	отс.	9,2	9,2	11,8	5,0	36	45	19
AUsn	24–30	1,12	отс.	9,6	7,2	11,2	6,0	30	46	24
ABs	35–55	0,41	1,8	9,3	6,0	10,4	0,0	37	63	0
BCAdc,s	60–80	н/о	20,1	9,5	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о
BCAdc,s	90–100	н/о	19,7	9,5	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о
Cca,s	125–135	н/о	6,5	9,6	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о
Cca,s	155–165	н/о	7,3	9,4	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о
КС-20-10 Каштановая засоленная мелкая среднесуглинистая Protocalcic Someric Kastanozem (Loamic, Salic)*										
AJs	0–13	1,20	отс.	8,3	19,0	8,0	1,0	68	29	3
BMKs	13–30	0,64	3,5	8,9	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о
CATs	30–42	н/о	7,9	8,6	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о
BCAdc,s	50–80	н/о	11,9	8,6	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о
Cca,s	90–110	н/о	12,8	8,9	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о
КС-21-16 Каштановая солонцеватая засоленная мелкая среднесуглинистая Protocalcic Someric Kastanozem (Loamic, Salic, Sodic)*										
AJsn	0–10	1,16	отс.	8,1	7,2	7,2	3,0	41	41	18
BMKsn	10–20	1,12	отс.	8,1	7,0	9,8	9,0	27	38	35
CATs	25–35	н/о	4,2	9,0	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о
BCAdc,s	40–60	н/о	11,3	9,5	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о
2Cca	80–100	н/о	2,9	9,9	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о
3Cca	110–130	н/о	1,4	9,9	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о
КС-21-17 Солончак глеевый тяжелосуглинистый Gleyic Solonchak (Loamic, Alcalic, Chloridic)*										
S	0–10	0,40	12,4	8,9	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о
Gca,s1	20–40	н/о	7,2	8,8	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о
Gca,s2	60–70	н/о	3,4	9,0	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о
КС-20-4 Чернозем глинисто-иллювиальный оподзоленный маломощный среднесуглинистый Luvic Greyzemec Chernozem (Loamic, Protocalcic, Humic)*										
AU1	0–8	2,96	отс.	6,1	26,5	7,2	0,10	79	21	0
AU2	15–25	2,58	отс.	6,2	25,7	7,5	0,07	77	23	0
AUe	33–42	0,91	отс.	6,4	15,6	8,0	0,06	66	34	0
BI	45–80	0,52	отс.	6,9	16,6	9,1	0,06	65	35	0
BCAdc1	85–95	н/о	8,8	8,6	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о
BCAdc2	100–120	н/о	25,2	8,7	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о
Cca	130–150	н/о	13,1	8,6	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о
2Cca	150–160	н/о	9,4	8,7	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о

Примечание.

н/о – значения не определялись.

отс. – при обработке образца отсутствовала реакция на 10% HCl.

*название почв приведено по IUSS Working Group WRB (2022).

Солевой профиль. В черноземах (разрезы КС-20-5, КС-20-6) сумма солей в горизонтах их максимума составила 0,49–0,53%, сумма токсичных солей – 0,48–0,51%. В каштановых почвах (разрезы КС-20-10, КС-21-16) сумма солей составила 0,90–2,06%, сумма токсичных солей – 0,80–1,26%.

В вертикальном распределении солей всех почв наблюдается тенденция к срединно-аккумулятивному виду (рис. 7).

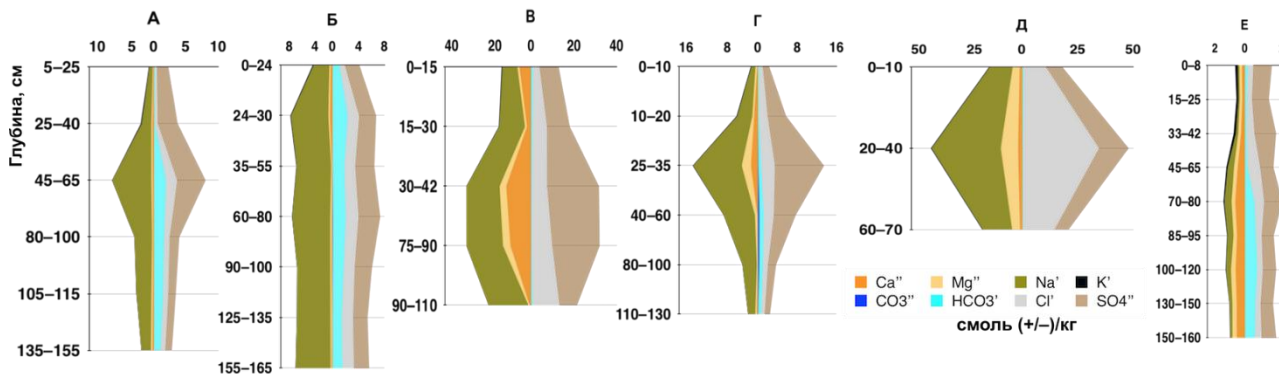


Рисунок 7. Солевые профили почв: (А) разрез КС-20-5, чернозем под залежью; (Б) разрез КС-20-6, чернозем под косимой залежью; (В) разрез КС-20-10, каштановая почва под галофитной степью; (Г) разрез КС-21-16, каштановая почва под типчаковой степью; (Д) разрез КС-21-17, солончак; (Е) разрез КС-20-4, чернозем под лесополосой.

Глубина залегания горизонта максимального накопления солей находится на отметках 25–50 см у черноземов и около 30–40 см у каштановых почв. По глубине этого горизонта почвы относятся к солончаковым и солончаковатым видам.

Наибольшую долю в составе анионов имеют сульфаты, в составе катионов – натрий (см. рис. 7). Сода в составе солей в черноземах не преобладает, но обнаруживает высокие концентрации. Химизм засоления – содово-сульфатный натриевый, степень засоления – сильная.

С участием соды в химизме связаны величины pH свыше 9,0 (см. табл. 2). Такой тип засоления способствует развитию солонцового процесса в почвах Кулундинской степи (Елизаров и др., 2023).

Для провинции сульфатно-содового соленакопления, к которой относится Кулундинская степь, обычно содовое и сульфатно-содовое засоление. Однако в наиболее глубоких понижениях встречается хлоридно-сульфатное засоление (Ковда, 1946). Так, развитые на озерных террасах каштановые почвы имеют хлоридно-сульфатный и хлоридно-сульфатный с гипсом натриевый тип засоления. Гипс в каштановых почвах при морфологическом описании не выявлен, но отмечен аналитически. Почвы относятся к сильной (разрез КС-21-16) и очень сильной степени засоления (разрез КС-20-10).

По сравнению с черноземами в катионном составе солей каштановых почв хорошо заметно присутствие кальция и магния (см. рис. 7 В, Г), что отражается на уменьшении доли натрия в ППК (см. табл. 2). Так, в присутствии солей щелочноземельных оснований накопления соды обычно не происходит (Базилевич, 1965).

Различия в содержании солей каштановых почв мы связываем с гранулометрическим составом. В каштановой почве разреза КС-20-10 (см. рис. 7 В) на сравнительно однородной тяжелосуглинисто-глинистой породе засоление выражено существенно сильнее, чем в почве разреза КС-21-16 (см. рис. 7 Г), развитой на литологически неоднородных озерно-аллювиальных отложениях: подстиание тяжелосуглинистой породы супесчано-песчаной толщей. На зависимость накопления солей от гранулометрического состава и увеличение их содержания по мере его утяжеления указывалось в литературе по почвам Алтайского края (Каблова и др., 2003).

Почва в дельте реки Кучук (разрез КС-21-17) отличается химизмом засоления и более высоким содержанием солей (см. рис. 7 Д). Соленакопление здесь происходит под действием неглубоко залегающих грунтовых вод. Грунтовые воды находятся на глубине 80 см. По данным более ранних исследований с участием авторов статьи грунтовые воды территории, приуроченной к Кучук-Кулундинской озерной системе, имеют сульфатно-хлоридный натриево-магниевый состав, реже – гидрокарбонатно-хлоридный натриевый. Минерализация вод может изменяться от 1 до 136 г/л. Аномально высокие концентрации грунтовых вод объясняются гидравлической связью с поверхностными водами горько-соленых озер.

Присутствие солей в пределах верхних 20 см профиля в количестве, превышающем 1%, и наличие глеевого горизонта дают основание классифицировать почву как солончак гидроморфный. При этом максимум засоления у солончака, как и у других почв, находится не в верхнем горизонте, а на глубине около 30 см. Сумма солей в горизонте максимума составляет 2,72%, сумма токсичных солей – 2,61%.

В составе солей солончака среди анионов преобладают хлориды, среди катионов – натрий, подчиненное положение занимают сульфаты и магний, соответственно. Химизм засоления оценивается как сульфатно-хлоридный магниевое-натриевый.

Почва разреза КС-20-4 под лесополосой (см. рис. 7 Е) содержит соли в количестве, не превышающем 0,1%, поэтому считается незасоленной.

ОБСУЖДЕНИЕ

Почвообразование Кучук-Кулундинских приозерных ландшафтов определяется влиянием как общезональных, так и провинциальных факторов, а также особыми литолого-геохимическими и геоморфологическими условиями, в результате чего почвы отличаются от европейских зональных типов.

Провинциальные черты изученных черноземов (разрезы КС-20-5, КС-20-6) тесно связаны с карбонатным профилем. Считается, что в западной части Предалтайской провинции под разнотравно-типчачково-ковыльными степями наибольшее распространение имеют черноземы южные, для которых характерен горизонт с карбонатами в форме белоглазки (Добровольский, Урусевская, 2006).

В классификации 2004 г. (Классификация ..., 2004) черноземы южные в основном соответствуют черноземам текстурно-карбонатным с выраженным горизонтом белоглазки. Однако в рассмотренных нами черноземах новообразования в виде сегрегационных форм (белоглазки или журавчиков) не встречаются, а в каштановых почвах встречаются редко; преобладают диффузные пропиточные формы карбонатов (Симонова и др., 2024б).

В современных классификациях (Классификация ..., 2004; Полевой ..., 2008) характер карбонатного профиля при выделении подтипов черноземов выведен на первый план, то есть вид карбонатного новообразования отражает модификации горизонта ВСА, учитываемые на уровне подтипа (Хитров, Герасимова, 2022). Поэтому черноземы Кучук-Кулундинских ландшафтов с пропиточными формами мы относим к черноземам дисперсно-карбонатным. Поскольку эти черноземы имеют, кроме того, и признаки солонцеватости, то мы классифицировали их как черноземы дисперсно-карбонатные солонцеватые (Классификация ..., 2004).

Диффузные карбонатные новообразования в степных западносибирских черноземах отмечены в литературе как отличительные провинциальные черты (Смоленцев и др., 2010; Смоленцева, 2020; Кравцов, Смоленцева, 2022). Предполагается, что карбонаты в виде пропитки образуются, когда гидрокарбонатные растворы передвигаются на короткие расстояния вследствие недостатка влаги (Полевой ..., 2008), обусловленного более континентальным климатом по сравнению с климатом европейских черноземов.

Подтип черноземов дисперсно-карбонатных примерно соответствует черноземам южным умеренно и длительно промерзающим в классификации 1977 г. (Классификация ..., 1977). Такие почвы формируются в засушливых степных ландшафтах Сибири: на юге Красноярского края, в Новосибирской и Омской областях, Алтайском крае, Хакасии, степных зонах Тывы (Жуланова, 2010; Шпедт и др., 2019; Черноусенко, 2022). Особенно они находят распространение в межгорных котловинах Прибайкалья и забайкальских степях (Ногина, 1964; Убугунов и др., 2019), то есть в условиях резко континентального климата с долгой и очень холодной малоснежной зимой.

Хорошо известно, что на морфологию карбонатных новообразований непосредственно влияет гидротермический режим почв, однако на сегодняшний день имеющиеся в литературе данные в полной мере не объясняют условий образования пропиточных форм карбонатов (Ковда, Хохлова, 2015). Специально не исследуя этот вопрос, можно предположить, что в отношении форм карбонатных новообразований черноземы южные и каштановые почвы Предалтайской степной и сухостепной провинций (юг Западной Сибири) по карбонатному состоянию занимают промежуточное положение между почвами сухих и засушливых степей Европейской территории России и черноземами и каштановыми почвами, соответственно, восточносибирской группы. В первом случае мы имеем дело с сегрегационными формами в виде белоглазки, во втором – с мучнистыми карбонатами в виде сплошной белесой пропитки, образующейся в результате криогенного окарбонирования. Последние

относятся к фации длительно и глубоко промерзающих почв – промерзают на 2,5–3,5 м, более пяти месяцев находятся в мерзлом состоянии и медленно оттаивают (Добровольский, Урусевская, 2006).

По-видимому, для формирования пропиточных карбонатов в климатическом аспекте имеет значение не столько наличие жаркого засушливого лета, сколько сезонная контрастность и продолжительный морозный период с малоснежной зимой и глубоким промерзанием.

Необходимо отметить, что среди черноземов южных и каштановых почв межгорных котловин Восточной Сибири встречается много сильнозасоленных вариантов (Черноусенко, 2022). Это обстоятельство могло бы указывать на дополнительный фактор появления такого типа карбонатных образований. Однако среди почв юга Восточной Сибири и Монголии встречаются каштановые почвы, развитые на легких и щебнистых отложениях, не относящиеся к засоленным, но при этом так же с мучнистыми формами карбонатов (Панкова, Черноусенко, 2018). Следовательно, фактор засоления не является обязательным для формирования черноземов и каштановых почв с дисперсными формами карбонатов.

Наличие ржавых прожилок по ходам корней, как и творожистая структура, часто ассоциируется с оглеением. Несмотря на то, что влияния грунтовых вод во всех изученных почвах (кроме солончака) не отмечено, в нижней части профиля некоторых почв имеются тонкие ржавые прожилки, частично замаскированные на карбонатном фоне. Обнаружение таких признаков в автоморфных почвах может объясняться относительно недавним осушением поверхности, которое привело к тому, что в природных комплексах всех высотных уровней Кулунды сохранились черты реликтового гидроморфизма (Булатов и др., 2005; Засоленные почвы ..., 2006).

Другой вероятной причиной специфической структуры нижних горизонтов почв может являться промерзание. Так, провинциальные морфогенетические особенности нижних горизонтов красноярских лесостепных черноземов связывают со своеобразием гидротермического режима (Семина, Вередченко, 1962). В результате длительного сезонного промерзания в нижней части почвенного профиля появляется слой повышенной влажности, вызывающий у почв нормального увлажнения черты гидроморфизма. При этом карбонатные новообразования представлены псевдомицелием и мучнистыми пятнами.

Дополнительную специфику структуре нижних горизонтов и строению карбонатного профиля приозерных почв Кучук-Кулундинской системы придает неоднородность гранулометрического состава, которая способна существенно влиять на динамику водного и теплового режима. Так, по мнению Н.А. Ногиной (1964), неоднородность гранулометрического состава, которая проявляется в содержании крупных фракций, являлась важным фактором неравномерного распределения карбонатов в профиле мучнистокарбонатных почв Забайкалья.

Плоский рельеф и местоположение в пределах бассейна конечного стока в системе озер (поступление солей превышает возможности их выноса) обуславливает засоление всех изученных нами почв. Рассмотренные черноземы и каштановые почвы характеризуются засолением средней и нижней частей профиля и лучшей промытостью от солей верхней. Более высокую степень засоления каштановых почв мы связываем с их положением на террасах озер, тогда как обследованные нами черноземы занимают приводораздельные пространства.

Отличительной особенностью климата является превышение испаряемости над количеством выпадающих осадков, что на фоне слабой дренированности равнин способствует накоплению солей в почвах, породах и водах.

Согласно Карте химизма засоления почв Алтайского края (Засоленные почвы ..., 2006) рассмотренные черноземы принадлежат к области преимущественно содового засоления с долей средне- и сильнозасоленных почв от 50 до 25%, а каштановые почвы – к области преимущественно сульфатного и хлоридно-сульфатного засоления с долей средне- и сильнозасоленных почв от 50 до 25%. Химизм засоления изученных почв с преобладанием сульфатов согласуется с сульфатным гидрохимическим типом озер Кучук и Кулундинское (см. табл. 1).

Наличие легкорастворимых, главным образом, сульфатных солей и высокое содержание карбонатов, по нашему мнению, служит одной из причин появления творожистой (коагуляционной) структуры и многочисленных округлых пор (газовых) в нижних горизонтах профиля (BCA, CAT, Cca), которые отмечены нами на уровне мезоморфологии.

На форму солевого профиля и дифференциацию солей влияют особенности климата территории. По мнению Н. И. Базилевич (1965), в степной и лесостепной зонах юга Западной Сибири климат благоприятствует процессам частичного рассоления и выщелачивания более легкоподвижных хлоридов и сульфатов и остаточного накопления соды. Само же появление соды в составе солей в

значительной степени определяется карбонатностью почв, в которых создаются условия внеконкурентного поглощения натрия (Боровский, 1978).

Рассмотренные нами черноземы имеют содово-сульфатный натриевый химизм засоления, что при периодическом промывании верхней части профиля атмосферными осадками вызывает процесс современного осолонцевания. Морфологическими признаками процесса являются кутаны и призматическая структура нижней части гумусового горизонта, аналитическими – высокая доля обменного натрия в ППК и повышение доли илистой фракции в этой же части профиля.

Высокое содержание натрия в ППК в солонцеватых разностях можно отнести к региональным особенностям почв. Так, например, рассмотренные нами ранее солонцы Кучук-Кулундинских ландшафтов относились к многонатриевым, с содержанием натрия свыше 40% (Симонова и др., 2024а).

В разрезах почв КС-20-6 и особенно КС-21-16 содержание натрия в ППК оказалось более характерным для солонцов, чем для черноземов и каштановых почв, однако морфологические признаки этих почв соответствуют только солонцеватым подтипам указанных типов. Тем не менее, вопрос, какие из признаков являются более значимыми для классификации почвы, остается открытым. В случае признания превосходства аналитических признаков почв над морфологическими классификационное положение упомянутых разностей стоит заменить на «солонцы темные» и «солонцы светлые».

Помимо общезональных и провинциальных, отмечено влияние локальных условий почвообразования, таких как наличие лесных полей защитных полос. Так, если под заброшенными полями рядом с лесополосой почвы представлены черноземами дисперсно-карбонатными солонцеватыми (чернозем южный), то под лесополосой – черноземом глинисто-иллювиальным (чернозем выщелоченный). Черноземы выщелоченные относятся к более северным вариантам черноземов и не характерны для Предалтайской степной провинции. В изученном нами разрезе под лесополосой (разрез КС-20-4) на поверхности развита лесная подстилка, гумусовый горизонт имеет комковато-ореховатую структуру, в выщелоченной части присутствуют тонкие глинистые кутаны, железистые прожилки. В ППК преобладает обменный кальций и не содержится натрия. Засоление в почве отсутствует, а мощность выщелоченной от карбонатов толщи достигает 80 см.

Понижение глубины залегания карбонатов, увеличение мощности гумусового горизонта, наличие гляцевых пленок иллювиирования отмечается под лесополосами в черноземах лесостепи Европейской территории России (Чендев и др., 2024).

Лесным полосам в Кулундинской степи отводится важная роль в качестве мероприятий по предотвращению процессов опустынивания (Ишутин и др., 2005). Зимой в них накапливается снег, а весной талые воды способствуют лучшему промачиванию, понижению линии вскипания и увеличению мощности выщелоченной части (Кравцов, Смоленцева, 2022). Наши наблюдения относительно значения лесополос в Кулундинской степи согласуются с литературными данными.

ВЫВОДЫ

1. В пределах Кучук-Кулундинских ландшафтов различие почв на высоком таксономическом уровне обусловлено зональными и провинциальными особенностями, а также особыми геоморфологическими и литолого-геохимическими условиями. Черноземы принадлежат Предалтайской степной провинции, каштановые почвы – Предалтайской сухостепной провинции, солончаки формируются в дельтах рек, понижениях с близко залегающими грунтовыми водами.

2. Провинциальными особенностями почв является маломощный гумусовый профиль и дисперсные формы карбонатных новообразований. Особенности почвообразования приозерных ландшафтов Кулундинской впадины является засоление и солонцеватость с высокой долей обменного натрия и магния.

3. Химизм засоления черноземов и каштановых почв характерен для западносибирской области соленакопления с высоким участием соды. Почвы имеют сильную и очень сильную степень засоления; каштановые почвы характеризуются более высоким содержанием солей по сравнению с черноземами.

4. Под лесозащитными полосами формируются черноземы глинисто-иллювиальные, значительно выщелоченные от солей и карбонатов.

ЛИТЕРАТУРА

Базилевич Н.И. Геохимия почв содового засоления. Москва: Наука, 1965. 350 с.

Боровский В.М. Геохимия засоленных почв Казахстана. Москва: Наука, 1978. 192 с.

Булатов В.И., Ротанова И.Н., Черных Д.В. Ландшафтно-экологический и картографический анализ озерно-бассейновых систем юга Западной Сибири (озера Чаны и Кулундинское) // Сибирский экологический журнал. 2005. Том 12. № 2. С. 175–182.

Валяшко М.Г. Геохимические закономерности формирования месторождений калийных солей. Москва: Изд-во МГУ, 1962. 397 с.

Воробьева Л.А. Химический анализ почв: Учебник. Москва: Изд-во МГУ, 1998. 272 с.

Герасимов И.П., Иванова Е.Н. Процессы континентального соленакопления в почвах, породах, подземных водах и озерах Кулундинской степи // Труды Почвенного института им. В.В. Докучаева. 1934. № 9. С. 103–136.

Герасимов И.П., Розов Н.Н., Ромашкевич А.И. Почвы // Природные условия и естественные ресурсы СССР. Западная Сибирь. Москва: Изд-во АН СССР, 1963. С. 158–194.

Горшенин К.П. Почвы южной части Сибири (от Урала до Байкала). Москва: Изд-во АН СССР, 1955. 592 с.

Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Алтай-Саянская. Лист N-44 – Новосибирск / гл. науч. ред. В.С. Волкова. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2015. [Электронный ресурс]. URL: https://karpinskyinstitute.ru/ru/info/pub_ggk1000-3/preview/n-44.php (дата обращения 01.09.2024).

Добровольский Г.В., Урусевская И.С. География почв: учебник. 3-е изд. Москва: Изд-во Моск. ун-та: Наука, 2006. 460 с.

Елизаров Н.В., Попов В.В., Рыбкина И.Д., Смоленцев Б.А. Засоление и осолонцевание почв речных долин Кулундинской равнины // Почвоведение. 2023. № 10. С. 1216–1229. <https://doi.org/10.31857/S0032180X23600191>

Жуланова В.Н. Современная морфогенетическая характеристика обыкновенных черноземов Тувы // Вестник Тувинского государственного университета. Естественные и сельскохозяйственные науки. 2010. № 2. С. 60–68.

Засоленные почвы России / Панкова Е.И., Воробьева Л.А. и др.; отв. ред. Л.Л. Шишов, Е.И. Панкова. Москва: ИКЦ «Академкнига», 2006. 854 с.

Ишутин Я.Н., Парамонов Е.Г., Стоящева Н.В. Лесные экосистемы в экологическом каркасе Кулундинской степи // Ползуновский вестник. 2005. № 4. С. 83–88.

Каблова Н.Ю., Татаринцев Л.М., Татаринцев В.Л. Особенности соленакопления в почвах Кулундинской степи // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2003. № 8. С. 60–62.

Казанцев В.А. О происхождении солей в почвах и водах Барабинской и Кулундинской равнин // Почвоведение. 1990. № 12. С. 16–25.

Классификация и диагностика почв СССР / Составители: В.В. Егоров, В.М. Фридланд, Е.Н. Иванова, Н.Н. Розов, 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.

Ковда В.А. Происхождение и режим засоленных почв. Москва–Ленинград: Изд-во АН СССР, 1946. Том 1. 573 с.

Ковда И.В., Хохлова О.С. Карбонатный профиль почв // Эволюция почв и почвенного покрова. Теория, разнообразие природной эволюции и антропогенных трансформаций почв. Москва: ГЕОС, 2015. С. 140–158.

Колпакова М.Н., Борзенко С.В., Исупов В.П., Шацкая С.С., Шварцев С.Л. Гидрохимия и геохимическая типизация соленых озер степной части Алтайского края // Вода: химия и экология. 2015. № 1(79). С. 11–16.

Королук А.Ю., Смоленцев Б.А., Лашинский Н.Н. Почвенно-растительный покров приозерной равнины Кулундинского озера // Растительный мир Азиатской России: Вестник Центрального сибирского ботанического сада СО РАН. 2008. № 2. С. 80–88.

Кравцов Ю.В., Смоленцева Е.Н. Особенности современного генезиса плакорных почв Ишимской степи // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2022. № 111. С. 116–156. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2022-111-116-156>

Курачев В.М., Рябова Т.Н. Засоленные почвы Западной Сибири. Новосибирск: Наука, 1981. 152 с.

Ногина Н.А. Почвы Забайкалья. Москва: Изд-во АН СССР, 1964. 314 с.

Панкова Е.И., Черноусенко Г.И. Сопоставление каштановых почв центральной Азии с их аналогами в других почвенно-географических провинциях сухостепной зоны суббореального пояса Евразии // Аридные экосистемы. 2018. Том 24. № 2(75). С. 13–21.

Полевой определитель почв. Москва: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 2008. 182 с.

- Почвы Кулундинской степи / Ковалев Р.В., Панин П.С. и др.; отв. ред. Р.В. Ковалев. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1967. 291 с.
- Растворова О.Г. Физика почв (Практическое руководство). Ленинград: Изд-во Ленингр. ун-та, 1983. 196 с.
- Растворова О.Г., Андреев Д.П., Гагарина Э.И., Касаткина Г.А., Федорова Н.Н. Химический анализ почв: Учебное пособие. Санкт-Петербург: Изд-во С.-Петербургского ун-та. 1995. 264 с.
- Семина Е.В., Вередченко Ю.П. Черноземы Красноярской лесостепи и их провинциальные особенности // О почвах Урала, Западной и Центральной Сибири; Е.Н. Иванова (отв. ред.). Москва: Изд-во АН СССР, 1962. С. 170–189.
- Симонова Ю.В., Жунусова О.Р., Чарыкова М.В., Касаткина Г.А. Почвенно-геохимическая оценка засоления территории, прилегающей к Кучукскому месторождению солей (Алтайский край) // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. 2024а. Том 69. № 1. С. 185–212. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2024.110>
- Симонова Ю.В., Касаткина Г.А., Чарыкова М.В. Почвы Кучукско-Кулундинских приозерных ландшафтов (Алтайский край, Западная Сибирь): особенности морфологии, засоления, классификации // Почва как компонент биосферы: актуальные проблемы в условиях изменений климата. Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 120-летию со дня рождения чл.-корр. АН СССР В.А. Ковды / ИФХиБПП РАН. Пушино: 2024б. С. 109–111.
- Смоленцев Б.А., Соколов Д.А., Коронатова Н.Г., Беланов И.П., Гаврилов Д.А., Кармышева Н.В., Степанова В.А., Милеева Е.В. Использование классификаций почв СССР 1977 года и России 2004 года в полевых исследованиях степных и лесостепных ландшафтов Западной Сибири // Почвоведение и агрохимия. 2010. № 2. С. 5–11.
- Смоленцева Е.Н. Черноземы Западной Сибири: региональные и зонально-провинциальные особенности // Отражение био-, гео-, антропогенных взаимодействий в почвах и почвенном покрове. Сборник материалов VII Международной научной конференции, посвященной 90-летию кафедры почвоведения и экологии почв ТГУ (Томск, 14–19 сентября 2020 г.) / С.П. Кулижский (отв. ред.). Томск: Издательский Дом Томского государственного университета, 2020. С. 90–94.
- Убугунов Л.Л., Белозерцева И.А., Убугунова В.И., Сороковой А.А. Районирование почв бассейна озера Байкал: экологический подход // Природа Внутренней Азии. 2019. № 2(11). С. 40–59. <https://doi.org/10.18101/2542-0623-2019-2-40-59>
- Урусевская И.С., Алябина И.О., Шоба С.А. Карта почвенно-экологического районирования Российской Федерации. Масштаб 1:8 000 000. Пояснительный текст и легенда к карте: Учебное пособие. Москва: МАКС Пресс, 2020. 100 с.
- Харламова Н.Ф. Климат Алтайского региона: учебник. Барнаул: Изд-во Алтайского ун-та, 2013. 108 с.
- Харламова Н.Ф., Казарцева О.С. Распределение снеготопливных запасов на территории Алтайского края // Бюллетень науки и практики. 2017. № 4(17). С. 162–169.
- Хитров Н.Б. Выбор диагностических критериев существования и степени выраженности солонцового процесса в почвах // Почвоведение. 2004. № 1. С. 18–31.
- Хитров Н.Б., Герасимова М.И. Диагностические горизонты в классификации почв России: версия 2021 г // Почвоведение. 2021. № 8. С. 899–910. <https://doi.org/10.31857/S0032180X21080098>
- Хитров Н.Б., Герасимова М.И. Предлагаемые изменения в классификации почв России: диагностические признаки и почвообразующие породы // Почвоведение. 2022. № 1. С. 3–14. <https://doi.org/10.31857/S0032180X22010087>
- Цифровая версия карты почвенно-экологического районирования Российской Федерации. Масштаб 1 : 8 000 000 / под ред. И.С. Урусевской, 2019. [Электронный ресурс]. URL: <https://soil-db.ru/map?name=eco> (дата обращения 22.04.2025).
- Чендев Ю.Г., Геннадиев, А.Н., Смирнова М.А., Лебедева М.Г. Лесные полосы как фактор почвообразования в агроландшафтах юга Среднерусской возвышенности // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2024. № 4. С. 94–108. <https://doi.org/10.55959/MSU0579-9414.5.79.4.8>
- Черноусенко Г.И. Засоленные почвы котловин юга Восточной Сибири: Монография. Москва: МАКС Пресс, 2022. 480 с.
- Шпедт А.А., Аксенова Ю.В., Жуланова В.Н., Рассыпнов В.А., Ерунова М.Г., Бутырин М.В. Оценка агрочерноземов Сибири на основе современных подходов // Земледелие. 2019. № 4. С. 8–13. <https://doi.org/10.24411/0044-3913-2019-10402>

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. 234 p.

Meyer B.C., Schreiner V., Smolentseva E.N., Smolentsev B.A. Indicators of desertification in the Kulunda Steppe in the south of Western Siberia // Archives of Agronomy and Soil Science. 2008. Vol. 54. No. 6. P. 585–603. <https://doi.org/10.1080/03650340802342268>

Поступила в редакцию 12.05.2025

Принята 30.06.2025

Опубликована 04.07.2025

Сведения об авторах:

Симонова Юлия Владимировна – кандидат биологических наук, ассистент кафедры почвоведения и экологии почв Института наук о Земле ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет» (г. Санкт-Петербург, Россия); uvsim@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5835-5099>

Касаткина Галина Алексеевна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник Центрального музея почвоведения имени В.В. Докучаева – филиал ФГБНУ ФИЦ «Почвенный институт имени В.В. Докучаева» (г. Санкт-Петербург, Россия); kasatkina-galina@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0003-5224-1957>

Чарыкова Марина Валентиновна – доктор геолого-минералогических наук, профессор с возложенными обязанностями заведующего кафедрой геохимии Института наук о Земле ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет» (г. Санкт-Петербург, Россия); m-char@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8311-0325>

Жунусова Оксана Радиковна – лаборант-исследователь Института наук о Земле ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет»; аспирант, младший научный сотрудник ФГБУ «Государственный Гидрологический институт» (г. Санкт-Петербург, Россия); zhun.oksana@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0004-0518-4029>

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 Kuchuk-Kulunda lakeside landscapes (Altai Krai): morphology, salinization, taxonomic attribution

© 2025 Yu. V. Simonova ¹, G. A. Kasatkina ², M. V. Charykova ¹, O. R. Zhunusova ¹

¹Saint Petersburg State University, Universitetskaya nab., 7–9, Saint Petersburg, Russia. E-mail: uvsim@yandex.ru

²Dokuchaev Central Soil Science Museum, Branch of the Dokuchaev Soil Science Institute, Birzhevoy proezd, 6, Saint Petersburg, Russia. E-mail: kasatkina-galina@mail.ru

The aim of the study was to identify the features of soil formation in the Kuchuk-Kulunda landscapes, highlighting common provincial features and those associated with the influence of local lithological-geomorphological and geochemical conditions.

Location and time of the study. Steppe and dry steppe soil zones of West Siberia, Kulunda steppe, Altai Region, Russia. Field research was conducted in 2020–2021.

Methods. Morphological features (macro- and mesolevel) important for diagnostics of carbonate forms, solonetz process, salinization and lithological features of soils were studied. Salinity attributes, exchangeable bases, carbonate content, organic matter and particle-size analysis were determined.

Results. When examining the soils of the Kuchuk-Kulundinsky lakeside landscapes, it was revealed that chernozems (Protocalcic Chernozems) belong to the Cis-Altai steppe province, chestnut soils (Kastanozems) belong to the Cis-Altai dry steppe province, and Solonchaks are formed in river deltas and depressions with closely located groundwater. The soils are formed on strata lacustrine-alluvial deposits with a high proportion of dust fraction in the particle-size distribution and heterogeneity in the content of sand fraction. Characteristic features of chernozems are the small thickness of humus horizons and the prevalence of dispersed forms of carbonates. This is confirmed by a number of published data about the morphological structure of West Siberian chernozems. In chestnut soils on the terraces of the basins of the lakes Kuchuk and Kulundinskoye, the well-formed carbonate

neoformations like nodules are also absent; carbonate neoformations in the form of impregnation and diffuse spots are common. Chernozems and chestnut soils of the Kuchuk-Kulundinsky landscapes belong to solonetzic and saline subtypes with a strong and very strong degree of salinization. The accumulative salt horizon is located in the middle part of the soil profiles. The ion-salt composition is dominated by sulfates and sodium. In the chemistry of chernozems salinization, the participation of soda is expressed more strongly than in the chestnut soils. In solonetzic soils, the exchangeable sodium and magnesium percentage is very high. Soils under shelterbelts have a higher content of organic matter, are more deeply leached of carbonates and contain virtually no water-soluble salts.

Conclusions. *Provincial soil features include a thin humus profile and dispersed forms of carbonate neoformations. The influence of geomorphological and lithological-geochemical conditions of lakeside landscapes consists in the distribution of saline and solonetzic varieties. High carbonate content, salinity, lithic discontinuity and specific hydrothermal regime of deeply frozen soils determine the structure of the middle and lower horizons of the profile. Under the forest shelterbelts, Luvic Greyzemic Chernozems are formed, non-saline and significantly leached of carbonates.*

Keywords: *Kulunda steppe; southern chernozems; Protocalcic Chernozems; Kastanozems; Luvic Greyzemic Chernozems; impregnating carbonates; shelterbelts.*

How to cite: *Simonova Yu.V., Kasatkina G.A., Charykova M.V., Zhunusova O.R. Soils of the Kuchuk-Kulunda lakeside landscapes (Altai Krai): morphology, salinization, taxonomic attribution. The Journal of Soils and Environment. 2025. 8(3). e313. DOI: 10.31251/pos.v8i3.313 (in Russian with English abstract).*

REFERENCES

- Bazilevich N.I. Geochemistry of soils with sodic salinization. Moscow: Nauka Publ., 1965. 350 p. (in Russian).
- Borovskij V.M. Geochemistry of salt-affected soils of Kazakhstan. Moscow: Nauka Publ., 1978. 192 p. (in Russian).
- Bulatov V.I., Rotanova I.N., Chernyh D.V. Landscape-ecological and cartographic analysis of lake basin systems of the south of West Siberia (Lakes Chany and Kulunda). *Sibirskij Ekologicheskij Zhurnal*. 2005. Vol. 12. No. 2. P. 175–182. (in Russian).
- Valyashko M.G. Geochemical regularities of formation potash deposits. Moscow: Moscow University Press., 1962. 397 p. (in Russian).
- Vorobyova L.A. Chemical analysis of soils: Textbook. Moscow: Moscow University Press., 1998. 272 p. (in Russian).
- Gerasimov I.P., Ivanova E.N. Processes of continental salt accumulation in soils, rocks, underground waters and lakes of the Kulunda steppe. *Proceedings of the V.V. Dokuchaev Soil Institute*. 1934. No. 9. P. 103–136. (in Russian).
- Gerasimov I.P., Rozov N.N., Romashkevich A.I. Soils. In book: *Natural conditions and natural resources of the USSR. Western Siberia*. Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1963. P. 158–194 (in Russian).
- Gorshenin K.P. Soils of the southern part of Siberia (from the Urals to Baikal). Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1955. 592 p. (in Russian).
- State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1:1 000 000 (third generation). Altai-Sayan Series. Sheet N-44 – Novosibirsk / V.S. Volkova (ed.). St. Petersburg: Kartograficheskaya fabrika VSEGEI Publ., 2015. [Electronic resource]. URL: https://karpinskyinstitute.ru/ru/info/pub_ggk1000-3/preview/n-44.php (accessed on 01.09.2024). (in Russian).
- Dobrovolskij G.V., Urusevskaya I.S. Geography of soils: Textbook. 3d ed. Moscow: Moscow University Press., Nauka Publ., 2006. 460 p. (in Russian).
- Elizarov N.V., Popov V.V., Rybkina I.D., Smolentsev B.A. Salinization and solonetzization of soils in river valleys of the Kulunda Plain. *Eurasian Soil Science*. 2023. Vol. 56. No. 10. P. 1381–1393. <https://doi.org/10.1134/S1064229323601439>
- Zhulanova V.N. Modern morphogenetic characteristics of ordinary chernozems of Tuva. *Vestnik of Tuvan State University. Natural and Agricultural sciences*. 2010. No. 2. P. 60–68. (in Russian).
- Salt-affected soils of Russia / Pankova E.I., Vorob'eva L.A. et al.; L.L. Shishov, E.I. Pankova (ed.). Moscow: Akademkniga Publ., 2006. 854 p. (in Russian).
- Ishutin Ya.N., Paramonov E.G., Stoyashcheva N.V. Forest ecosystems in the ecological framework of the Kulunda steppe. *Polzunovskiy vestnik*. 2005. No. 4. P. 83–88. (in Russian).
- Kablova N.Yu., Tatarincev L.M., Tatarincev V.L. Features of salt accumulation in the soils of the Kulunda steppe. *Bulletin of Altai State Agricultural University*. 2003. No. 8. P. 60–62. (in Russian).
- Kazantsev V.A. On the origin of salts in Baraba and Kulunda soils and waters. *Pochvovedenie*. 1990. No. 12. P. 16–25. (in Russian).

- Classification and diagnostics of soils of the USSR / Compiled by: V.V. Egorov, V.M. Friedland, E.N. Ivanova, N.N. Rozov, V.A. Nosin, T.A. Friev. Moscow: Kolos Publ., 1977. 224 p. (in Russian).
- Classification and diagnostics of soils of Russia / Authors and compilers: L.L. Shishov, V.D. Tonkonogov, I.I. Lebedeva, M.I. Gerasimova. Smolensk: Oykumena Publ., 2004. 342 p. (in Russian).
- Kovda V.A. Origin and regime of saline soils. Moscow–Leningrad: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1946. Vol. 1. 573 p. (in Russian).
- Kovda I.V., Khokhlova O.S. Carbonate profile of soils. In book: Theory, Diversity of Natural Evolution and Anthropogenic Transformations of Soils. Moscow: GEOS, 2015. P. 140–158. (in Russian).
- Kolpakova M.N., Borzenko S.V., Isupov V.P., Shatskaya S.S., Shvartsev S.L. Hydrochemistry and geochemical typification of salt lakes steppes of the Altai Territory. Water: Chemistry and Ecology. 2015. No. 1(79). P. 11–16. (in Russian).
- Korolyuk A.Yu., Smolencev B.A., Lashchinskij N.N. Soil and vegetation cover of the circumlake plain of Lake Kulunda. Rastitel'nyj mir Aziatskoj Rossii. 2008. No. 2. P. 80–88. (in Russian).
- Kravtsov Yu.V., Smolentseva E.N. Features of modern genesis of the Ishim steppe watershed plain soils. Dokuchaev Soil Bulletin. 2022. No. 111. P. 116–156. (in Russian). <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2022-111-116-156>
- Kurachev V.M., Ryabova T.N. Salt-affected soils of Western Siberia. Novosibirsk: Nauka Publ., 1981. 152 p. (in Russian).
- Nogina N.A. Soils of Transbaikalia. Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1964. 314 p. (in Russian).
- Pankova E.I., Chernousenko G.I. Comparison of chestnut soils of Central Asia with their analogs in other soil-geographical provinces of the dry-steppe zone of the Eurasian subboreal belt. Arid Ecosystems. 2018. Vol. 8. No. 2. P. 89–96. <https://doi.org/10.1134/S2079096118020051>
- Field guide for Russian soils. Moscow: Dokuchaev Soil Science Institute, 2008. 182 p. (in Russian).
- Soils of the Kulunda steppe / Kovalev R.V., Panin P.S. et al.; R.V. Kovalev (ed.). Novosibirsk: Nauka Publ., 1967. 291 p. (in Russian).
- Rastvorova O.G. Soil Physics (Practical Guide). Leningrad: Leningrad University Press, 1983. 196 p. (in Russian).
- Rastvorova O.G., Andreev D.P., Gagarina E.I., Kasatkina G.A., Fedorova N.N. Chemical analysis of soils: Textbook. St. Petersburg: St. Petersburg University Press, 1995. 264 p. (in Russian).
- Semina E.V., Veredchenko Yu.P. Chernozems of the Krasnoyarsk forest-steppe and their provincial features. In book: About the soils of the Urals, Western and Central Siberia; E.N. Ivanova (ed.). Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1962. P. 170–189. (in Russian).
- Simonova Yu.V., Zhunusova O.R., Charykova M.V., Kasatkina G.A. Soil-geochemical assessment of salinization of the territory adjacent to the Kuchuk salt deposit (Altai Krai). Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences. 2024a. Vol. 69. No. 1. P. 185–212. (in Russian). <https://doi.org/10.21638/spbu07.2024.110>
- Simonova Yu.V., Kasatkina G.A., Charykova M.V. Soils of the Kuchuk-Kulundinsky lakeside landscapes (Altai Krai, Western Siberia): specific features of morphology, salinization, taxonomic designation. Soil as a component of the biosphere: current problems in the context of climate change. Proceedings of the All-Russian scientific conference with international participation dedicated to the 120th anniversary of the birth of V.A. Kovda. Puschino, 2024b. P. 109–111. (in Russian).
- Smolencev B.A., Sokolov D.A., Koronatova N.G., Belanov I.P., Gavrilov D.A., Karmysheva N.V., Stepanova V.A., Milyaeva E.V. Using the 1977 USSR and 2004 Russian soil classifications in field studies of steppe and forest-steppe landscapes of Western Siberia. Soil Science and Agrochemistry (Publisher: JSC "Kazakh Research Institute of Soil Science and Agrochemistry named after U.U. Uspanov"). 2010. No. 2. P. 5–11. (in Russian).
- Smolenceva E.N. Chernozems of Western Siberia: regional and zonal-provincial features. Reflection bio-, geo-, antropospheral interactions in soil and soil cover: collection of materials VII International Scientific Conference dedicated to the 90th anniversary of the department of Soil Science and Soil Ecology TSU (Tomsk, September 14–19, 2020) / S.P. Kulizhskiy (ed.). Tomsk: Publishing House of Tomsk State University, 2020. P. 90–94. (in Russian).
- Ubugunov L.L., Belozertseva I.A., Ubugunova V.I., Sorokovoy A.A. Soil zoning of the Lake Baikal basin: an environmental approach. Nature of Inner Asia. 2019. No. 2(11). P. 40–59. (in Russian). <https://doi.org/10.18101/2542-0623-2019-2-40-59>
- Urusevskaja I.S., Aljabina I.O., Shoba S.A. Map of soil-ecological zoning of the Russian Federation. Scale 1 : 8 000 000. Explanatory text and legend for the map: Tutorial. Moscow: MAKSS Press, 2020. 100 p. (in Russian).

- Harlamova N.F. Climate of the Altai region: textbook. Barnaul: Altai University Publ., 2013. 108 p. (in Russian).
- Harlamova N.F., Kazarceva O.S. Distribution of snow reserves in the Altai Territory. Bulletin of Science and Practice. 2017. No. 4(17). P. 162–169. (in Russian).
- Khitrov N.B. Selection of diagnostic criteria for the existence and degree of expression of the solonetz process in soils. Pochvovedenie. 2004. No. 1. P. 18–31. (in Russian).
- Khitrov N.B., Gerasimova M.I. Diagnostic horizons in the classification system of Russian soils: version 2021. Eurasian Soil Science. 2021. Vol. 54. No. 8. P. 1131–1140. <https://doi.org/10.1134/S1064229321080093>
- Khitrov N.B., Gerasimova M.I. Diagnostic properties and soil forming materials in the classification system of Russian soils: version of 2021. Eurasian Soil Science. 2022. Vol. 55. No. 1. P. 1–10. <https://doi.org/10.1134/S1064229322010082>
- Digital version of the soil-ecological zoning map of the Russian Federation. Scale 1 : 8 000 000 / I.S. Urusevskaja (ed.), 2019. [Electronic resource]. URL: <https://soil-db.ru/map?name=eco> (accessed on 22.04.2025). (in Russian).
- Chendev Yu.G., Gennadiev A.N., Smirnova M.A., Lebedeva M.G. Shelterbelts as a factor of soil formation in agrolandscapes of the southern part of the central Russian upland. Lomonosov Geography Journal. 2024. No. 4. P. 94–108. (in Russian). <https://doi.org/10.55959/MSU0579-9414.5.79.4.8>
- Chernousenko G.I. Salt-affected soils of the depressions of the south of Eastern Siberia: Monograph. Moscow: MAKSPress, 2022. 480 p. (in Russian).
- Shpedt A.A., Aksenova Y.V., Zhulanova V.N., Rassypnov V.A., Erunova M. G., Butyrin M. V. Assessment of Agrochernozems of Siberia based on modern approaches. Zemledelie. 2019. No. 4. P. 8–13. (in Russian). <https://doi.org/10.24411/0044-3913-2019-10402>
- 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. 234 p.
- Meyer B.C., Schreiner V., Smolentseva E.N., Smolentsev B.A. Indicators of desertification in the Kulunda Steppe in the south of Western Siberia. Archives of Agronomy and Soil Science. 2008. Vol. 54. No. 6. P. 585–603. <https://doi.org/10.1080/03650340802342268>

Received 12 May 2025

Accepted 30 June 2025

Published 04 July 2025

About the author(s):

Yulia V. Simonova – Candidate of Biological Sciences, Assistant at the Department of Soil Science and Ecology of Soils in the Institute of Earth Sciences, St. Petersburg State University (St. Petersburg, Russia); uvsim@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5835-5099>

Galina A. Kasatkina – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher in the Dokuchaev Central Soil Science Museum, Branch of the Dokuchaev Soil Science Institute (St. Petersburg, Russia); kasatkina-galina@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0003-5224-1957>

Marina V. Charykova – Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor, Head of the Department of Geochemistry in the Institute of Earth Sciences, St. Petersburg State University (St. Petersburg, Russia); m-char@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8311-0325>

Oksana R. Zhunusova – Laboratory Research Assistant in the Institute of Earth Sciences, St. Petersburg State University; PhD student, Junior Resercher in the State Hydrological Institute (St. Petersburg, Russia); zhun.oksana@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0004-0518-4029>

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.v8i3.338>



Внутрипольное зонирование почвенного покрова по данным геофизических методов

© 2025 Е. В. Балков ¹, П. А. Барсуков ², А. Е. Шалагинов ¹, Ю. Г. Карин ¹, А. В. Прокопьев³,
О. А. Русалимова ²

¹ФГБУН Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, проспект Академика Коптюга 3, г. Новосибирск, 630090, Россия. E-mail: Karinyg@ipgg.sbras.ru

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

³ФГАОУ ВО «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет», ул. Пирогова, 1, г. Новосибирск, 630090, Россия. E-mail: a.prokopev2@ngsu.ru

Цель исследования. Апробация применения методов малоглубинной электроразведки для решения задач внутрипольного зонирования почвенного покрова сельскохозяйственных угодий.

Место и время проведения. Исследования выполнены на полях ООО «Рубин» в Краснозерском районе Новосибирской области (53,81° с.ш., 79,29° в.д.) в мае 2025 года.

Методы. Методы исследования включали аэрофотосъемку с применением квадрокоптера Dji Mavic Air, электромагнитное профилирование аппаратурой ЭМС, электротомографию аппаратурой Скала, георадиолокацию аппаратурой Око, анализ гранулометрического состава и влажности почвы.

Основные результаты. Получена карта распределения удельного электрического сопротивления (УЭС) путем трансформации сигнала аппаратуры ЭМС, на которой выделены зоны высокого и низкого сопротивления. Зонам более высокого сопротивления соответствуют повышенные элементы рельефа, а также «красные» зоны на карте среднемноголетнего вегетационного ASF-индекса, то есть участки с относительно низкими плодородием почвы и урожайностью. Зоны низкого сопротивления приурочены к пониженным элементам рельефа с повышенной влажностью почв. Данный эффект обусловлен перераспределением влаги после весеннего снеготаяния и интенсивных осадков по поверхности почвы из областей с повышенными высотными отметками в сторону понижения рельефа, а также водоудерживающей способностью почв, связанной с их различным гранулометрическим составом в «красной» и «зеленой» зонах по ASF-индексу. Обнаружена сильная прямая корреляционная связь между УЭС и содержанием песчаной фракции и обратная зависимость с содержанием тонкодисперсных фракций. По данным методов электротомографии и георадиолокации на профиле, проходящем из «зеленой» в «красную» зону по ASF-индексу, выявлено постепенное увеличение значений УЭС и появление слоистой структуры отложений, подстилающих гумусово-аккумулятивный (А) и переходный (АВ) почвенные горизонты. Это наиболее вероятно свидетельствует о резком снижении содержания почвенного органического вещества и увеличении песчаной фракции в гранулометрическом составе почв, подстилающих А+АВ горизонты.

Заключение. Применение малоглубинных методов электроразведки и аэрофотосъемки позволяет проводить зонирование исследуемых почв по УЭС в горизонтальном и вертикальном направлениях. Геофизические методы могут уточнить внутрипольное зонирование почвенного покрова, полученного на основе вегетационных индексов, а также сократить объем полевых и лабораторных (химико-аналитических) исследований свойств почв, от которых, тем не менее, невозможно полностью отказаться для выявления истинных причин снижения плодородия почв и, соответственно, урожайности сельскохозяйственных культур в «красных» зонах по ASF-индексу.

Ключевые слова: почвенный покров; внутрипольное зонирование; электромагнитное профилирование; георадиолокация; электротомография; аэрофотосъемка; вегетационные индексы; ASF-индекс; гранулометрический состав; влажность почвы.

Цитирование: Балков Е.В., Барсуков П.А., Шалагинов А.Е., Карин Ю.Г., Прокопьев А.В., Русалимова О.А. Внутрипольное зонирование почвенного покрова по данным геофизических методов // Почвы и окружающая среда. 2025. Том 8. № 3. е338. DOI: [10.31251/pos.v8i3.338](https://doi.org/10.31251/pos.v8i3.338)

ВВЕДЕНИЕ

Сельское хозяйство имеет решающее значение для продовольственной безопасности и устойчивого развития национальной экономики, обеспечивая население продовольствием, сырьем для химической и легкой промышленности, рабочими местами (Otsuka, 2013; Pawlak, Kołodziejczak, 2020),

но часто сталкивается с проблемами низкой урожайности и рентабельности, особенно в зонах рискованного земледелия, например, в Сибири. Решение этих проблем возможно благодаря применению точного земледелия, важнейшим элементом которого является управление продуктивностью возделываемых культур с учетом внутривидовой вариативности почвенного покрова (Бикбулатова, 2008; Abobatta, 2021; Sanyaolu, Sadowski, 2024). Вариативность свойств почв в пределах поля может быть зафиксирована как наземными методами (полевые почвенные, агрофизические, агрохимическими), так и разнообразными методами дистанционного зондирования (Шаповалов и др., 2020; Якушев, 2024; Abobatta, 2021). Однако, как мы полагаем, наиболее полную информацию о распределении различных параметров и свойств почв в пространстве, которая необходима для разработки стратегии проведения агротехнологических операций на каждом поле, можно получить лишь при комплексировании различных методов исследования.

В рамках этой публикации представлены первые результаты совместного применения аэрофотосъемки, электромагнитного профилирования, электротомографии, георадиолокационных изысканий, анализа базовых физических свойств почв (гранулометрический состав и влажность) и данных дистанционного зондирования – вегетационного индекса ASF. В качестве объекта исследования было выбрано одно из полей сельскохозяйственного предприятия ООО «Рубин», расположенного в Краснозёрском районе Новосибирской области.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальная работа проведена в южной лесостепи Западной Сибири на территории сельскохозяйственного предприятия ООО «Рубин». Территория хозяйства с геоморфологической точки зрения расположена в пределах размытой аллювиальной аккумулятивной равнины (древние междуречья). Это обуславливает очень сложный («пестрый») состав почвообразующих пород в минералогическом отношении и гранулометрическом составе. Почвообразующие породы и, соответственно, почвы на территории хозяйства по своему гранулометрическому составу очень разнообразны и включают средние (реже тяжелые) суглинки песчано-иловатые и иловато-песчаные, легкие суглинки и супеси иловато-песчаные (Почвенно-климатический ..., 1978). Даже в пределах одного поля часто встречаются почвы разного генезиса, которые различаются по своему гранулометрическому составу, морфологическому строению почвенного профиля, степени засоления и другим свойствам. Это обуславливает большую «пестроту» почвенного плодородия и, соответственно, различную урожайность сельскохозяйственных культур в пределах одного поля, что существенно затрудняет анализ почвенного покрова с точки зрения его физико-химических и агрохимических свойств.

В пределах хозяйства в конце мая 2025 г. проведено обследование поля № 3-6, имеющего площадь 150,5 га. Центральная часть этого поля имеет следующие географические координаты: 53,81° с.ш., 79,29° в.д. На всех полях хозяйства, включая поле № 3-6, более 10 лет практикуется технология No-Till (система земледелия, предусматривающая полный отказ от обработки почвы, оставление стерни и других растительных остатков на ее поверхности и прямой посев семян специальными сеялками в необработанную почву). Посевной культурой в предшествующий год (2024 г.) был горох, а в 2025 г. – рапс. В соответствии с последним почвенным обследованием территории, куда в настоящее время входит поле № 3-6, почвенный покров этого поля представлен следующими почвенными разностями, расположенными в порядке убывания занимаемой ими площади: лугово-черноземные обыкновенные среднесуглинистые, черноземы выщелоченные й р-н среднегумусные среднесуглинистые, черноземы выщелоченные среднемошные среднегумусные легкосуглинистые, солончаки луговые тяжелосуглинистые, лугово-черноземные солонцеватые тяжелосуглинистые (Почвенная ..., 1971). Названия вышеуказанных почв приведены в соответствии с классификаций почв СССР (Классификация ..., 1977).

Обследование почвенного покрова поля № 3-6 было выполнено следующими методами.

Аэрофотосъемка. Развитие гражданских версий беспилотных летательных аппаратов позволяет получать информацию высокой точности и детальности об объектах на поверхности Земли без физического контакта с ними. С помощью установленной на беспилотный летательный аппарат камеры можно проводить фотографирование территории с различных ракурсов по плотной сетке с высоким процентом перекрытия (Балков и др., 2020). Аэрофотосъемка (АФС) поля проводилась с высоты 100 м с помощью дрона DJI Mavic Air. Фотограмметрическая обработка данных аэрофотосъемки проводилась в ПО Agisoft Metashape. Визуализация карт высот по данным аэрофотосъемки выполнялась в ПО Surfer.

Электромагнитное профилирование. Профилирование выполняли на частоте 100 кГц, трехкатушечной электромагнитной аппаратурой ЭМС (Балков, 2011), которая, в том числе, содержит генераторную и две приемные катушки. Регистрируемый приемными катушками сигнал от вторичного электромагнитного поля, возбуждаемого в исследуемой среде генераторной катушкой прибора, трансформируется в удельное электрическое сопротивление. Привязку измеренных данных к местности осуществляли с помощью GPS приемника, обеспечивающего точность позиционирования не хуже 10 см. Аппаратуру транспортировали на токонепроводящей тележке за гусеничным транспортером (рис. 1) со скоростью 10 км/ч по системе параллельных профилей, расстояние между которыми составляло 50 м.



Рисунок 1. Аппаратура ЭМС, буксируемая гусеничным транспортером (Фото Ю. Г. Карина).

Электротомография. Метод электротомографии представляет собой один из вариантов метода сопротивлений, в котором применяется многоэлектродная система с автоматическим переключением питающих и измерительных электродов по заранее заданному протоколу (Балков и др., 2023). В исследовании использовали аппаратуру «Скала-32К4» и измерительную установку типа «Шлюмберже». Шаг между электродами – 0,3 и 0,5 м. Исследования проводили в областях максимального и минимального значений ASF индекса, а также в области его наибольшего градиента.

Георадиолокация. Метод георадиолокации основан на явлении отражения электромагнитной волны от границ неоднородностей в изучаемой среде, на которых скачкообразно изменяются электрические свойства – электропроводность и диэлектрическая проницаемость (Оленченко и др., 2019). Георадиолокационные исследования выполняли с использованием георадара «ОКО-3» и двухчастотного антенного блока с центральной частотой 150/400 МГц. Георадиолокационные измерения выполнены в области максимального градиента значений ASF-индекса вдоль того же профиля, где проводили измерения методом электротомографии. Для сопоставления с данными электротомографии рассматривали радарограмму, зарегистрированную антенной 400 МГц, с лучшей детализацией верхней части разреза.

Вегетационный индекс ASF по данным дистанционного зондирования. ASF-индекс (Agronote soil fertility index) представляет собой разновидность среднееголетних вегетационных индексов, основанных на обработке больших массивов данных дистанционного зондирования – Satellite Big Data, Remote Sensing Big Data. Обязательная для расчетов нормализация данных дистанционного зондирования проводится на основе спектральной окрестности линии почв (spectral neighborhood of soil line). С биологической точки зрения ASF-индекс авторы интерпретируют как показатель различных уровней плодородия почв в пределах одного сельскохозяйственного поля и, таким образом, этот индекс является основой для составления карты устойчивой внутриполевой неоднородности почвенного плодородия (Шаповалов и др., 2020).

Гранулометрический состав почвенных образцов определяли разделяя мелкозем (< 2 мм) на три фракции: sand (песок) с размерами частиц > 63 мкм – ≤ 2 мм, silt (пыль) с размерами частиц > 2 мкм – ≤ 63 мкм и clay (глина) с размерами частиц ≤ 2 мкм, в соответствии с классами размеров частиц, принятыми в международной классификации почв WRB (IUSS Working Group WRB, 2022). В ходе выполнения анализа взвешивали фракции песка и пыли, а фракцию глины рассчитывали по разности.

Влажность почвы определяли стандартным термостатно-весовым методом, высушивая навеску почвы до постоянного веса при температуре 105°C (ГОСТ 28268-89).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

По данным аэрофотосъемки была построена карта высот (рис. 2). В юго-западной части поля № 3-6 отчетливо выделяется повышение рельефа, в то время как его восточная часть, особенно северные и южные оконечности, характеризуются пониженным рельефом.

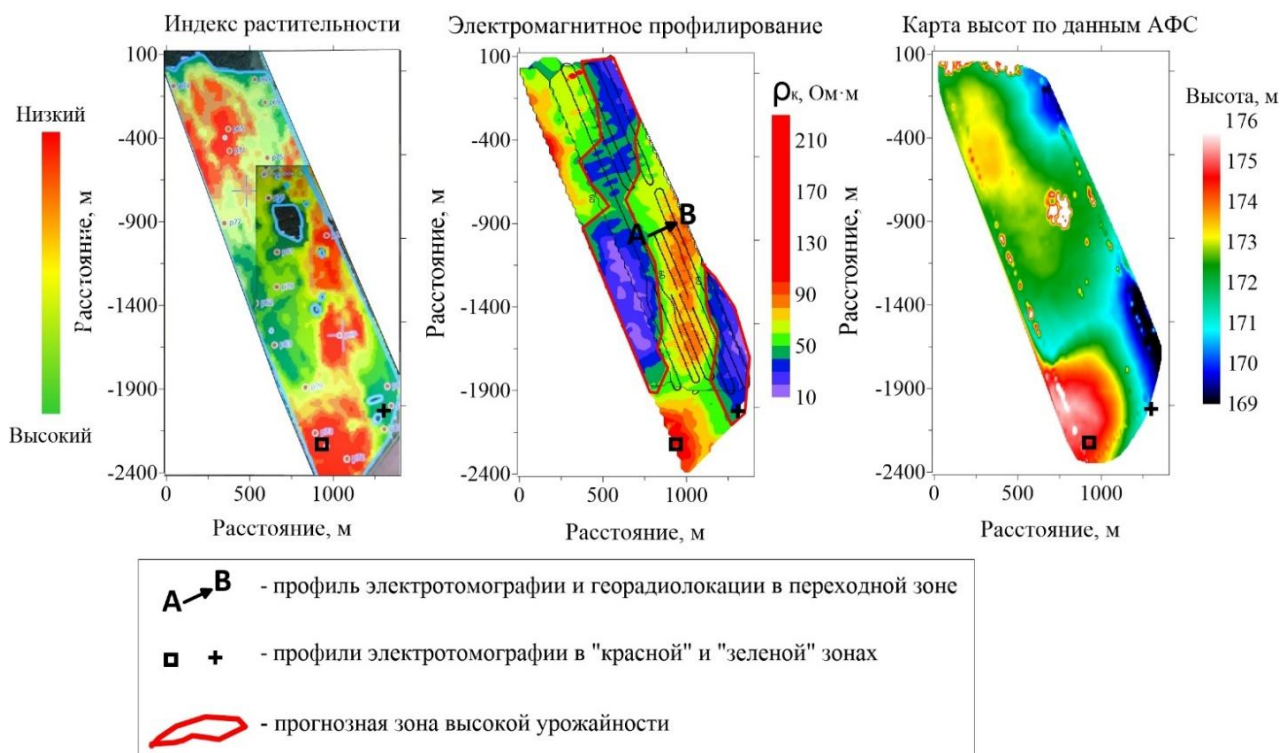


Рисунок 2. Результаты исследования почвенного покрова экспериментального участка различными геофизическими методами.

На карте распределения удельного электрического сопротивления (УЭС), полученного путем трансформации сигнала аппаратуры ЭМС, выделяются зоны высокого и низкого сопротивления (рис. 2). Зоны повышенного сопротивления прямо коррелируют с повышениями рельефа и обратно с влажностью почвы. Зоны низкого сопротивления приурочены к областям пониженного рельефа и повышенной влажности. Коэффициенты корреляции (R) между УЭС и влажностью почвы во всех исследуемых слоях почвы 0–30, 30–60 и 60–100 см оказались очень высокими и были равны -0,815, -0,858 и -0,689, соответственно. Очевидно, что влага после весеннего снеготаяния и интенсивных осадков мигрирует по поверхности почвы из областей с повышенными высотными отметками в сторону понижения рельефа. Кроме того, более высокое содержание влаги в почве обусловлено ее водоудерживающей способностью, которая в значительной степени определяется гранулометрическим составом почв: водоудерживающая способность почв значительно выше в почвах с преобладанием тонкодисперсных фракций (глина и пыль). Была установлена сильная корреляционная связь между УЭС и гранулометрическим составом почв в слое 0–30 см: положительная («прямая») для фракции sand (песок) ($R = 0,865$) и отрицательная («обратная») для фракций silt (пыль) и clay (глина) ($R = -0,864$ и $-0,857$, соответственно). Аналогичные сильные корреляционные связи были получены и для двух других анализируемых слоев почвы (30–60 см и 60–100 см).

По данным ASF-индекса (рис. 2), на поле № 3-6 выделяются «зеленая», «желтая» и «красная» зоны с повышенным, средним и низким плодородием почвы, соответственно. Высокое плодородие приурочено к зонам с повышенным содержанием почвенной влаги, почвам с более тяжелым гранулометрическим составом (т.е. с относительно более высокой долей тонкодисперсных фракций), пониженным рельефом и более низкими значениями удельного электрического сопротивления.

По профилю, проходящему из «зеленой» в «красную» зону в области максимального градиента ASF-индекса, выполнены измерения методами электротомографии и георадиолокации (рис. 3). По данным электротомографии, на геоэлектрическом разрезе по мере перехода из «зеленой» в «красную» зону происходит значительное повышение удельного электрического сопротивления на глубине 0,8–1,6 м. По данным георадарной съемки, отчетливо выделяется георадарный комплекс, соответствующий верхнему слою почвы мощностью до 60 см, с более высоким содержанием почвенного органического вещества, включающего в себя гумусово-аккумулятивный (A) и переходный к иллювиальному (AB) горизонты почв. В нижней части разреза (0,8–1,6 м) выделяется георадарный комплекс, в котором по мере перехода из «зеленой» в «красную» зону начинает проявляться выраженная косослоистая текстура, что характерно для аллювиальных отложений. Перспективность использования метода георадиолокации в почвенных исследованиях подтверждается применением этого метода при решении ряда специфических задач, таких, например, как исследование архитектуры корневой системы деревьев в толще почвы до глубины 4 м (Рязанцев и др., 2020). Таким образом, повышение значений удельного электрического сопротивления и появление косослоистой структуры в «красной» зоне по ASF-индексу свидетельствует о снижении содержания почвенного органического вещества в горизонтах A+AB, мощности этого слоя и, возможно, о некотором увеличении доли песчаной фракции в гранулометрическом составе почв.

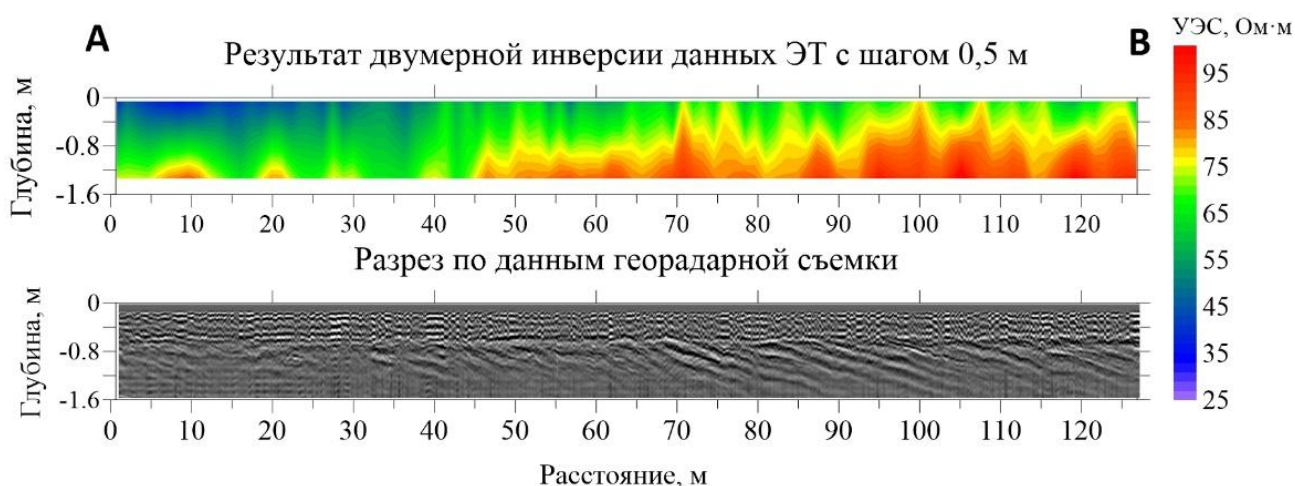


Рисунок 3. Результаты исследований почвенного покрова методами электротомографии и георадиолокации в переходной зоне (от «зеленой» к «красной») по ASF-индексу.

На двух участках в «зеленой» и «красной» зонах почвенный покров исследовали методом электротомографии (рис. 4). В результате на геоэлектрических разрезах в «зеленой» зоне отмечаются более низкие значения сопротивления по сравнению с «красной» зоной, которые с глубиной (ниже 1,0 м) уменьшаются, что, вероятно, обусловлено изменением гранулометрического состава от легко- или среднесуглинистого к тяжелосуглинистому. На профиле в «красной» зоне можно отметить сильную латеральную изменчивость УЭС от 55 до 120 Ом·м. С глубиной (ниже 1,0 м) сопротивление значительно увеличивается, что может быть вызвано повышением доли песчаной фракции в гранулометрическом составе почв и обусловленным этим снижением содержания влаги.

Представленные результаты являются частью выполненной нами работы и в дальнейшем будут дополнены корреляционными связями данных, полученных с помощью геофизических методов, и рядом почвенных параметров и свойств, таких как общее содержание почвенного органического вещества, его термолabileльных и термостабильных фракций, а также содержание подвижных пулов основных макро- и микроэлементов.

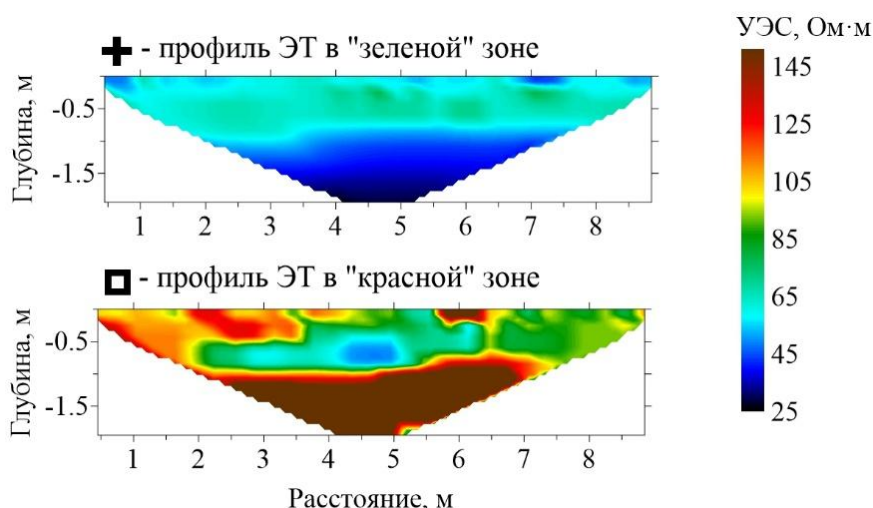


Рисунок 4. Результаты исследования двух локальных участков в «зеленой» и «красной» зонах методом электротомографии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Комплексное использование малоглубинных методов электроразведки, аэрофотосъемки с определением таких базовых физических свойств почв, как гранулометрический состав и влажность, способствовало повышению уровня информативности и эффективности при решении задач внутрипольного зонирования почвенного покрова сельскохозяйственных угодий. По результатам проведенных исследований можно отметить, что методы малоглубинной электроразведки позволяют уточнять внутрипольное зонирование почвенного покрова, полученного на основе вегетационных индексов (ASF, NDVI и другие), проводить зонирование исследуемых почв в горизонтальном и вертикальном направлениях. Это способствует сокращению времени и объема полевых и лабораторных (химико-аналитических) исследований свойств почв, от которых, тем не менее, нецелесообразно отказываться полностью при выявлении истинных причин снижения плодородия почв в «красных» зонах и, соответственно, урожайности сельскохозяйственных культур.

Очевидно, что применение этих методов должно найти широкое применение при почвенно-агрохимическом обследовании земельных угодий сельскохозяйственных предприятий, однако для усиления практической компоненты такой работы требуются проведение дальнейших исследований.

БЛАГОДАРНОСТИ

Коллектив авторов благодарит директора ООО «Рубин» Александра Николаевича Гросуля за возможность выполнения данной экспериментальной работы на территории этого сельскохозяйственного предприятия и помощь при ее проведении.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проекты № 121031700309-1 и № FWZZ-2022-0025). Геофизические полевые исследования выполнены при технической поддержке ООО «КБ Электротометрии».

ЛИТЕРАТУРА

- Балков Е.В. Технология малоглубинного частотного зондирования // Геофизика. 2011. № 6. С. 42–47.
- Балков Е.В., Карин Ю.Г., Позднякова О.А., Шапаренко И.О., Гоглев Д.А. Аэрофотосъемка с БПЛА в поисковых задачах археологии: обзор и практические примеры // Геофизические технологии. 2020. № 3. С. 38–47. <https://doi.org/10.18303/2619-1563-2020-3-38>
- Балков Е.В., Карин Ю.Г., Позднякова О.А., Фадеев Д.И., Шапаренко И.О. Комплексирование аэрофотосъемки, электромагнитного профилирования и электротомографии для изучения древних археологических поселений и городищ Новосибирской области // Геофизика. 2023. № 1. С. 26–33. <https://doi.org/10.34926/geo.2023.33.75.004>
- Бикбулатова Г.Г. Технология точного земледелия // Омский научный вестник. 2008. № 2(71). С. 45–49.
- ГОСТ 28268-89. Почвы. Методы определения влажности, максимальной гигроскопической влажности и влажности устойчивого завядания растений. Москва. Стандартинформ, 2006. 6 с.

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.

Оленченко В.В., Смоленцева Е.Н., Заплавнова А.А., Русалимова О.А., Барсуков П.А. Применение геофизических методов для оценки строения и свойств почв черноземного ряда // Почвы и окружающая среда. 2019. Том 2. № 1. с57. <https://doi.org/10.31251/pos.v2i1.57>

Почвенная карта совхоза «Хабаровский» Краснозерского района Новосибирской области (масштаб 1:25000) / Составлена Н. Ефименко и В. Филимоновой. Сибирский филиал «Росгипрозем», 1971.

Рязанцев П.А., Кабонен А.В., Родионов А.И. Определение архитектуры корневой системы деревьев методом георадиолокации // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2020. № 51. С. 179–204. <https://doi.org/10.17223/19988591/51/10>

Шаповалов Д.А., Королева П.В., Калинина Н.В., Вильчевская Е.В., Куляница А.Л., Рухович Д.И. ASF-index - карта устойчивой внутриполевой неоднородности плодородия почвенного покрова, построенная на основе больших спутниковых данных для задач точного земледелия // Международный сельскохозяйственный журнал. 2020. № 1. С. 9–15. <https://doi.org/10.24411/2587-6740-2020-11002>

Якушев В.В. Перспективы комплексной оценки почвенного плодородия на основе интерпретации данных дистанционного зондирования Земли // Плодородие. 2024. № 5. С. 5–8. <https://doi.org/10.25680/S19948603.2024.140.01>

Abobatta W.F. Precision Agriculture. Cambridge, MA, USA: Academic Press, 2021. P. 23–45.

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.

Otsuka K. Food insecurity, income inequality, and the changing comparative advantage in world agriculture // Agricultural Economics. 2013. Vol. 44. No. s1. P. 7–18. <https://doi.org/10.1111/agec.12046>

Pawlak K., Kołodziejczak M. The Role of Agriculture in Ensuring Food Security in Developing Countries: Considerations in the Context of the Problem of Sustainable Food Production // Sustainability. 2020. Vol. 12. No. 13. P. 5488. <https://doi.org/10.3390/su12135488>

Sanyaolu M., Sadowski A. The Role of Precision Agriculture Technologies in Enhancing Sustainable Agriculture // Sustainability. 2024. Vol. 16. No. 15. P. 6668. <https://doi.org/10.3390/su16156668>

Поступила в редакцию 29.09.2025

Принята 07.10.2025

Опубликована 13.10.2025

Сведения об авторах:

Балков Евгений Вячеславович – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории электромагнитных полей ФГБУН Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН (г. Новосибирск, Россия); BalkovEV@ipgg.sbras.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3712-6585>

Барсуков Павел Анатольевич – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории агрохимии ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск, Россия); barsukov.issa-siberia@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6554-9721>

Шалагинов Александр Евгеньевич – кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией электромагнитных полей ФГБУН Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН (г. Новосибирск, Россия); ShalaginovAE@ipgg.sbras.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3556-731X>

Карин Юрий Григорьевич – кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории электромагнитных полей ФГБУН Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН (г. Новосибирск, Россия); KarinYG@ipgg.sbras.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1469-5336>

Прокопьев Александр Валерьевич – студент геолого-географического факультета ФГАОУ ВО «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет», (г. Новосибирск, Россия); a.prokopev2@ng.su

Русалимова Ольга Александровна – младший научный сотрудник лаборатории агрохимии ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск, Россия); rusalimova.issa-siberia@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9802-2595>

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.



Intra-field zoning of soil cover based on geophysical methods

© 2025 E. V. Balkov ¹, P. A. Barsukov ², A. E. Shalaginov ¹, Yu. G. Karin ¹,
A. V. Prokopyev³, O. A. Rusalimova ²

¹*Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Akademika Koptyuga, 3, Novosibirsk, Russia. E-mail: Karinyg@ipgg.sbras.ru*

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

³*Novosibirsk State University, st. Pirogova, 1, Novosibirsk, Russia. E-mail: a.prokopev2@g.nsu.ru*

The aim of the study was to test the application of shallow electrical prospecting methods for intra-field zoning of soil cover of agricultural land.

Location and time of the study. The research was conducted on the fields of Rubin LLC in the Krasnozersky District of the Novosibirsk Region in May 2025.

Methods. The research methods included aerial photography using a Dji Mavic Air quadcopter, electromagnetic profiling using EMS equipment, electrical tomography using Skala equipment, ground-penetrating radar using Oke equipment and analysis of soil particle size distribution and moisture content.

Results. The map of electrical resistivity (ER) distribution, obtained by transforming the EMS signal, showed areas of high and low resistivity. The higher resistivity zones corresponded to elevated relief features, as well as the “red” zones on the map of the average annual vegetation ASF index, i.e. zones with relatively low soil fertility and crop yields. Areas of low resistivity were associated with lower relief features and higher soil moisture. This effect was due to the moisture redistribution on the soil surface after spring snowmelt and heavy precipitation from areas with higher elevations towards lower elevations, as well as the water retention capacity of soils due to their different granulometric composition in the “red” and “green” zones according to the ASF index. There was a strong direct correlation between the ER and the sand fraction content and an inverse relationship with the content of fine-grained fractions. According to the electrical tomography and ground-penetrating radar data for the transitional profile from the “green” to the “red” zone according to the ASF index, there was a gradual increase in ER values and the appearance of a layered structure of sediments underlying the humus-accumulative (A) and transitional (AB) horizons. The latter most likely indicated a sharp decrease in soil organic matter content and an increase in the sand fraction in the granulometric composition of the soils underlying the A+AB horizons.

Conclusions. The use of shallow electrical prospecting and aerial photography methods allows performing the zoning of the soils under ER investigation both horizontally and vertically. Geophysical methods can refine the intra-field zoning of soil cover based on vegetation indices, as well as reduce the field and laboratory (chemical analyzes) studies of soil properties, which, nevertheless, cannot be completely abandoned in order to identify the true causes of soil fertility and, accordingly, crop yields decline in the “red” zones according to the ASF index.

Keywords: soil cover; intra-field zoning; electromagnetic profiling; ground-penetrating radar; electrical tomography; aerial photography; vegetation indices; ASF index; granulometric composition; soil moisture.

How to cite: Balkov E.V., Barsukov P.A., Shalaginov A.E., Karin Yu. G., Prokopyev A.V., Rusalimova O.A. Intra-field zoning of soil cover based on geophysical methods. *The Journal of Soils and Environment*. 2025. 8(3). e338. DOI: [10.31251/pos.v8i3.338](https://doi.org/10.31251/pos.v8i3.338) (in Russian with English abstract).

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors are very thankful to Alexander Nikolaevich Grosul, Director of Rubin LLC, for allowing us to conduct our experimental work on the territory of this agricultural enterprise and for his assistance in carrying it out.

FUNDING

The study was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (projects No. 121031700309-1 and No. FWZZ-2022-0025). Geophysical field studies were performed with technical support from KB Elektrometriya L

REFERENCES

Balkov E.V. Technology shallow frequency sounding. *Journal of Geophysics*. 2011. No. 6. P. 42–47. (in Russian).

- Balkov E.V., Karin Yu.G., Pozdnyakova O.A., Shaparenko I.O., Goglev D.A. UAV photography in search problems of archeology: overview and practical examples. Russian Journal of Geophysical Technologies. 2020. No. 3. P. 38–47. (in Russian). <https://doi.org/10.18303/2619-1563-2020-3-38>
- Balkov E.V., Karin Yu.G., Pozdnyakova O.A., Fadeev D.I., Shaparenko I.O. Application of UAV photography, electromagnetic profiling and electrical resistivity tomography in ancient settlements and city-sites of the Novosibirsk region. Journal of Geophysics. 2023. No. 1. P. 26–33. (in Russian). <https://doi.org/10.34926/geo.2023.33.75.004>
- Bikbulatova G.G. Technology for precise agriculture. Omsk Scientific Bulletin. 2008. No. 2(71). P. 45–49. (in Russian).
- GOST 28268-89. Soils. Methods of determination of moisture, maximum hygroscopic moisture and moisture of steady plant fading. Moscow. Standartinform. 2006. 6 c. (in Russian).
- 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).
- Olenchenko V.V., Smolentseva E.N., Zaplavnova A.A., Rusalimova O.A., Barsukov P.A. Using geophysical methods to assess the structure and properties of Chernozemic soils. The Journal of Soils and Environment 2019. Vol. 2. No. 1. e57. (in Russian). <https://doi.org/10.31251/pos.v2i1.57>
- Soil map of the Khabarovsk state farm, Krasnozersky district, Novosibirsk region (scale 1:25000) / Compiled by N. Efimenko and V. Filimonova. Siberian Branch of Rosgiprozem, 1971. (in Russian).
- Ryazantsev PA, Kabonen AV, Rodionov AI. Detection of the tree root system architecture using Ground penetrating radar. Tomsk State University Journal of Biology. 2020. No. 51. P. 179–204. (in Russian). <https://doi.org/10.17223/19988591/51/10>
- Shapovalov D.A., Koroleva P.V., Kalinina N.V., Vilchevskaya E.V., Kulyanitsa A.L., Rukhovich D.I. ASF-index - a map of stable intra-field heterogeneity of soil cover fertility, based on big satellite data for precision agriculture tasks. International Agricultural Journal. 2020. No. 1. C. 9–15. (in Russian). <https://doi.org/10.24411/2587-6740-2020-11002>
- Yakushev V.V. Prospects for a comprehensive assessment of soil fertility based on the interpretation of remote sensing data. Plodorodie. 2024. No. 5. C. 5–8. <https://doi.org/10.25680/S19948603.2024.140.01>
- Abobatta W.F. Precision Agriculture. Cambridge, MA, USA: Academic Press, 2021. P. 23–45.
- 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.
- Otsuka K. Food insecurity, income inequality, and the changing comparative advantage in world agriculture. Agricultural Economics. 2013. Vol. 44. No. s1. P. 7–18. <https://doi.org/10.1111/agec.12046>
- Pawlak K., Kołodziejczak M. The Role of Agriculture in Ensuring Food Security in Developing Countries: Considerations in the Context of the Problem of Sustainable Food Production. Sustainability. 2020. Vol. 12. No. 13. P. 5488. <https://doi.org/10.3390/su12135488>
- Sanyaolu M., Sadowski A. The Role of Precision Agriculture Technologies in Enhancing Sustainable Agriculture. Sustainability. 2024. Vol. 16. No. 15. P. 6668. <https://doi.org/10.3390/su16156668>

Received 29 September 2025

Accepted 07 October 2025

Published 13 October 2025

About the authors:

Evgeny V. Balkov – Doctor of Technical Sciences, Leading Researcher in the Electromagnetic Fields Laboratory in the Institute of Petroleum Geology and Geophysics, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); BalkovEV@ipgg.sbras.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3712-6585>

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@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6554-9721>

Alexander E. Shalaginov – Candidate of Geology and Mineralogy, Head of the Electromagnetic Fields Laboratory in the Institute of Petroleum Geology and Geophysics, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); ShalaginovAE@ipgg.sbras.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3556-731X>

Yuri G. Karin – Candidate of Technical Sciences, Researcher in the Electromagnetic Fields Laboratory in the Institute of Petroleum Geology and Geophysics, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); KarinYG@ipgg.sbras.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1469-5336>

Alexander V. Prokopyev – Student at the Faculty of Geology and Geophysics, Novosibirsk State University (Novosibirsk, Russia); a.prokopyev2@g.nsu.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@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9802-2595>

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 631.84:631.41

<https://doi.org/10.31251/pos.v8i3.337>

Трансформация аммиачных, аммонийных и амидных удобрений в черноземных почвах

© 2025 П. А. Барсуков 

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

В обзоре рассмотрены процессы, происходящие с аммиачными, аммонийными и амидными удобрениями в первые 7–10 суток после их внесения в почву, а также факторы (как внешние абиотические, так и собственно почвенные), от которых зависит скорость процессов трансформации этих азотсодержащих соединений. Проанализировано влияние данных факторов/условий на агрогенно-преобразованные черноземные почвы, составляющие основу пахотного фонда черноземного пояса России, с относительно высоким содержанием почвенного органического вещества, гранулометрическим составом от легкосуглинистого до легкоглинистого, актуальной кислотностью от слабокислой до нейтральной. В заключение представлена схема основных процессов трансформации азотных удобрений и интенсивность этих процессов при допосевном или припосевном способах внесения туков в черноземных почвах в поздневесенний период (обычно приходящийся для условий земледельческих регионов Сибири на первую половину мая), что позволяет использовать результаты данного обзора в практических целях.

Ключевые слова: азот; удобрения; аммиачные; аммонийные; амидные; нитраты; трансформация удобрений в почве; черноземные почвы; Сибирь.

Цитирование: Барсуков П.А. Трансформация аммиачных, аммонийных и амидных удобрений в черноземных почвах // Почвы и окружающая среда. 2025. Том 8. № 3. е337. DOI: [10.31251/pos.v8i3.337](https://doi.org/10.31251/pos.v8i3.337)

ВВЕДЕНИЕ

Применение минеральных азотных удобрений, в которых азот представлен аммонийной и амидной формами, имеет длительную историю. Аммиачные удобрения (безводный аммиак) стали интенсивно применяться, начиная с конца 50-ых годов прошлого века в США. С развитием новых технологий производства удобрений и сельскохозяйственных машин для их внесения, роль этих форм удобрений только возрастала. В последние годы около 75% индустриального азота производится либо в аммонийной форме, либо в формах N, которые превращаются в NH_4^+ при внесении в почву (Kissel et al., 2008). Ещё в прошлом веке наметился устойчивый тренд увеличения производства **жидких минеральных удобрений (ЖМУ)**, содержащих азот в аммиачной форме не только в безводном аммиаке, но и в амидной и аммонийной формах в карбамидо-аммиачных смесях. В странах с высокоразвитым сельским хозяйством эти удобрения используются более чем на трети площади сельхозугодий. В США 55% азотных удобрений производится в жидком виде (Применение жидких азотных ..., 2020). В России производство и применение ЖМУ существенно уступает твёрдым минеральным удобрениям, но в последнее десятилетие их применение расширяется быстрыми темпами (Карабут, 2020). Применение ЖМУ в Сибири, хотя и началось сравнительно недавно, но также активно развивается, главным образом, благодаря деятельности Кемеровского АО «Азот» и его дочернего предприятия ООО «Центр передового земледелия» – являющихся одними из крупнейших производителей и поставщиков азотных удобрений в России.

Поскольку широкое применение ЖМУ началось в США и Западной Европе существенно раньше, чем в России, то к настоящему времени накоплен обширный материал о поведении азота ЖМУ и их эффективности в сельскохозяйственных экосистемах этих стран/регионов. Результаты проведённых там исследований опубликованы, преимущественно, в международных (англоязычных) журналах. В русскоязычной научной литературе эти вопросы освещены в меньшей степени.

В связи с этим, в настоящем обзоре предпринята попытка обобщить и представить в сжатой форме актуальную информацию об основных процессах трансформации азотных удобрений при их внесении в аммиачной, аммонийной и амидной формах, а также абиотических и биотических факторах, определяющих скорость этих процессов. В обзор включены процессы трансформации азота, происходящие преимущественно в первые часы и сутки (7–10 дней) после внесения удобрений. Другие важные процессы, происходящие с азотом удобрений в системе почва-растения (его поглощением растениями, денитрификация, выщелачивание нитратов) находятся за рамками настоящего обзора.

При оценке влияния абиотических факторов (температура, влажность) и базовых свойств почв (кислотность, гранулометрический состав и др.) на скорость процессов трансформации азотных

соединений, рассматривались условия, которые характерны, соответственно, для зоны распространения черноземных почв или присущи черноземным почвам. Последние составляют основу фонда пахотных угодий не только Западно-Сибирской равнины и южной части Средней Сибири, но и, в значительной степени, Восточно-Европейской равнины. Черноземы, занимая лишь 7% площади в нашей стране, составляют более половины пахотного фонда и обеспечивают производство 2/3 всей сельскохозяйственной продукции (Щеглов, 2017). При всех имеющихся генетических особенностях, верхняя часть гумусово-аккумулятивного слоя подавляющего большинства агрогенно-преобразованных (старопахотных) черноземных почв (оподзоленных, выщелоченных, обыкновенных, типичных, южных) имеет схожие характеристики (Национальный атлас почв ..., 2011), которые определяют интенсивность почвенных трансформационных процессов азотсодержащих соединений:

актуальная кислотность – от слабокислой до нейтральной;

гранулометрический состав – от легкосуглинистого до легкоглинистого;

содержания почвенно-органического вещества (гумуса) – от 4 до 10%;

преимущественно непромывной водный режим;

сходный температурный режим: относительно низкие температуры ($<10^{\circ}\text{C}$) осенью и весной, сезонная мерзлота.

ТЕРМИНЫ И СОКРАЩЕНИЯ

Коротко остановимся на особенностях терминологии, включая термины, используемые в англоязычной научной литературе, а также употребляемые в данной статье сокращения.

ЖМУ – жидкие минеральные удобрения;

БА – безводный аммиак;

КАС – карбамидо-аммиачные смеси;

ПОВ (SOM) – почвенное органическое вещество;

C_{org} (C_{org}) – углерод ПОВ;

Q_{10} – коэффициент температурного ускорения;

Экзогенный (exogenous) азот – азот внесенных удобрений;

Эндогенный (endogenous) азот – почвенный азот.

Формы азотных удобрений с некоторыми примерами:

- амидные удобрения – мочеви́на/карбамид (urea) и КАС (UAN – urea ammonium nitrate), содержащие азот исключительно или частично в форме аминогруппы NH_2^- ;

- аммиачные удобрения – безводный аммиак (anhydrous ammonia), содержащий азот в форме аммиака NH_3 (ammonia);

- аммонийные удобрения – сульфат аммония, КАС и аммонийная селитра/нитрат аммония, содержащие азот исключительно или частично в форме катиона аммония NH_4^+ (ammonium).

В соответствии с принятой терминологией (Murphy et al., 2003; Booth et al., 2005) все процессы, удаляющие аммоний из пула доступного (для усвоения) NH_4^+ (available NH_4^+), называются процессами потребления/расходования (consumption). Потребление NH_4^+ подразделяется на:

- биотическое потребление NH_4^+ (поглощение NH_4^+ почвенной микробиотой, нитрификация)

- абиотическое расходование NH_4^+ (фиксация (fixation) глинистыми минералами, хемосорбция (chemisorption or chemical adsorption) гумусовыми веществами).

Для обозначения биотического и абиотического потребления/расходования также используются термины иммобилизация (immobilization) и фиксация (fixation), соответственно (Braun et al., 2018). Несмотря на то, что термины ассимиляция, иммобилизация и даже поглощение в отношении минерального азота иногда используются как синонимы (Myrold et al., 2011), мы понимаем под этими процессами следующее. Поглощение азота растениями или микроорганизмами – поступление ионов NO_3^- , NH_4^+ и некоторых простых органических N-соединений (например, мочеви́на, аминокислота глутамин) в корневую систему растений или клетки микроорганизмов. Ассимиляция – трансформация поглощенных форм азота в органические соединения (аминокислоты и далее в более сложные биомолекулы) внутри клеток высших растений или микроорганизмов. В случае высших растений ассимиляции предшествует не только поглощение, но и транспорт с распределением между органами (транслокация). Иммобилизация (применяется, в основном, к микроорганизмам) – образование азотсодержащих биологических макромолекул микробной биомассы (из минеральных и органических N-соединений экзогенной и эндогенной природы) и побочных продуктов микробной активности (например, N-содержащих пептидов и аминокислот, а также углеводов и фенолов), благодаря деятельности экзоферментов, участвующих в деполимеризации детрита.

Сокращения, принятые для обозначения пулов аммиачного и аммонийного азота:

$\text{NH}_3(\text{атм})$ – газообразный аммиак почвенного воздуха/атмосферы;

$\text{NH}_3(\text{раств})$ – водный аммиак почвенного раствора;

$\text{NH}_4^+(\text{раств})$ – растворенный аммоний почвенного раствора (soluble NH_4^+);

$\text{NH}_4^+(\text{обм})$ – обменно-поглощенный аммоний (exchangeable NH_4^+);

$\text{NH}_4^+(\text{нд-фикс})$ – недавно-фиксированный аммоний из свежеснесенных удобрений (recently fixed NH_4^+);

$\text{NH}_4^+(\text{пр-фикс})$ – промежуточный (промежуточно-фиксированный) аммоний (intermediate NH_4^+);

$\text{NH}_4^+(\text{фикс})$ – (природно-)фиксированный аммоний (fixed или native fixed NH_4^+).

В русскоязычной научной литературе $\text{NH}_4^+(\text{нд-фикс})$ называют также искусственно фиксированным аммонием (Гамзиков и др., 1985; Кудяров, 1989).

Термины обменно-поглощенный и обменный аммоний нами используются как синонимы. При определении обменного аммония, учитывается и аммоний почвенного раствора (если не проводятся специальные исследования). Поэтому при рассмотрении процессов потребления NH_4^+ (где это специально не оговаривается) имеется ввиду сумма $[\text{NH}_4^+(\text{обм}) + \text{NH}_4^+(\text{раств})]$.

Учитывая, что большинство источников, используемых в обзоре, опубликовано в международных (англоязычных) изданиях, при рассмотрении гранулометрического состава почв мы называем наиболее тонкодисперсную фракцию <2 мкм (IUSS Working Group WRB, 2015) в соответствии с прямым переводом с английского («clay») как «глина», не вдаваясь в детали некоторого несоответствия по выделению границ определенных фракций в разных классификациях (Шейн, 2009).

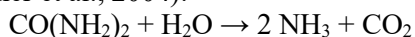
Ряд перечисленных выше терминов приводится также на английском языке для облегчения чтения оригинальных статей по этой тематике.

Процессы трансформации различных азотных удобрений рассматриваются в трех разделах соответственно формам экзогенного азота: амидной, аммиачной и аммонийной. Отдельный раздел посвящён нитрификации, а последний, обобщающий раздел включает количественную оценку процессов трансформации в черноземных почвах азота удобрений в первые сутки после их внесения.

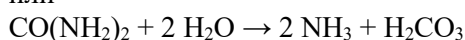
ПРОЦЕССЫ ПРИ ВНЕСЕНИИ В ПОЧВУ АМИДНОГО АЗОТА

При внесении в почву мочевины (карбамид), содержащая азот в виде аминокислоты, после растворения в почвенном растворе подвергается гидролизу, который является ферментативной реакцией: мочевина реагирует с водой в присутствии фермента уреазы, выделяемого почвенными бактериями. Транспорт мочевины в почве достигается молекулярной диффузией или массовым потоком воды. После контакта с ферментом, скорость гидролиза мочевины зависит от: (1) количества активных молекул уреазы (присутствующих практически во всех почвах) и (2) факторов, влияющих на активность молекул уреазы (Kissel et al., 2008).

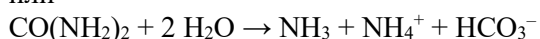
Реакцию гидролиза мочевины обычно записывают следующим образом (Stevenson, Cole, 1999; Sommer et al., 2004):



или

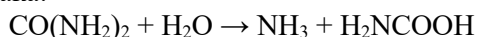


или

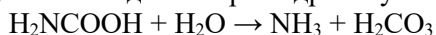


При более подробном рассмотрении, выделяют две фазы этой реакции (Sigurdarson et al., 2018):

(1Ф) Первая фаза является ферментативной реакцией, требует наличия уреазы в почве, характеризуется очень высокой скоростью и приводит к образованию карбаминовой кислоты и аммиака:



(2Ф) Карбаминовая кислота является нестабильным промежуточным продуктом, который в присутствии воды быстро гидролизует до аммиака и угольной кислоты:



Далее, взаимодействуя с водой, аммиак быстро превращается в аммонийный азот.

Основными факторами, контролирующими активность молекул уреазы, являются pH, температура и влажность почвы (Sommer et al., 2004; Kissel et al., 2008). Максимальная активность уреазы отмечена при величинах pH от 6,5 до 7,0 (Pettit et al., 1976), что соответствует реакции среды большинства черноземных почв. Скорость гидролиза мочевины резко замедляется лишь при остром

дефиците влаги. Однако такие условия обычно не наблюдаются в черноземных почвах в период основного внесения удобрений, как осенью, так и весной.

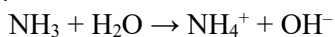
Влияние температуры в диапазоне от 5 до 45°C на скорость гидролиза мочевины соответствует правилу Вант-Гоффа с коэффициентом температурного ускорения Q_{10} равным 2 (Moyn et al., 1989). Напомним, что это правило отражает экспериментально обнаруженную зависимость для гомогенных химических реакций в температурном интервале от 0°C до 100°C: при повышении температуры на каждые 10°C скорость реакций увеличивается в 2–4 раза. Это правило действует также для многих биохимических/микробиологических реакций, но в еще более узком температурном диапазоне – от 0 до 40°C.

В обзорах (Sommer et al., 2004; Sigurdarson et al., 2018) сделан вывод, что при благоприятных условиях (которые характерны для черноземных почв), реакция гидролиза мочевины происходит быстро – от нескольких часов до нескольких дней. В опытах с тремя различающимися по свойствам почвами (при естественной влажности почв во время инкубации) гидролиз мочевины при благоприятной температуре полностью заканчивался в течение 2 дней после внесения этого удобрения (Smith et al., 1997). По данным (Wozniak, Baughman, 1996) почти 100% внесенной мочевины гидролизуется в течение 27 часов после внесения этого удобрения. Аналогичный вывод о высокой скорости трансформации амидного азота при благоприятных температуре и влажности получен А.Е. Ghaly и V.V. Ramakrishnan (2013). Авторы отмечают, что 98% внесенного с мочевиной азота трансформируется до нитратного азота (через промежуточную реакцию гидролиза мочевины до аммиака) и лишь 2% иммобилизуются почвенной микробиотой. Наиболее вероятно, что эти 2% экзогенного N поглощаются микроорганизмами непосредственно в форме азота аминогруппы, минуя стадию гидролиза. Несмотря на то, что почвенные микроорганизмы (в отличие от большинства культурных растений) способны поглощать азот мочевины, по-видимому, скорость ее гидролиза настолько высока, что почвенная микробиота значительно уступает в конкуренции за амидный N по сравнению с процессом гидролиза мочевины. В опытах без растений с внесением меченых ^{15}N разных форм азотных удобрений в чернозем обыкновенный (Западная Сибирь) иммобилизация экзогенного азота из мочевины оказалась больше в среднем на 6,5% от внесенного N по сравнению с хлористым аммонием (Гамзиков и др., 1985). Полагаем, что это различие частично обусловлено иммобилизацией азота мочевины почвенной микробиотой.

В черноземных почвах при основном допосевном способе внесения мочевины (в позднеосенний период), режимы температуры и влажности, как правило, благоприятны для ее быстрого гидролиза до аммиака. На основании данных (Ghaly, Ramakrishnan, 2013) допускаем, что лишь 2% от внесенного азота мочевины не гидролизуется, а поглощается почвенными микроорганизмами

ПРОЦЕССЫ ПРИ ВНЕСЕНИИ В ПОЧВУ АММИАЧНОГО АЗОТА

Поступивший в почву азот безводного аммиака (БА) подвергается нескольким процессам физической и химической природы. Физическими механизмами являются диффузия аммиака в свободные поровые пространства почвы, его растворение в жидкой фазе почвы и физическая сорбция/фиксация на поверхности почвенных частиц вследствие полярной природы молекулы NH_3 (Nommik, Vahtras, 1982). Из химических процессов имеет место хемосорбция NH_3 гумусовыми веществами, а также превращение растворенного NH_3 в ионы NH_4^+ (Kissel et al., 2008; Benke et al., 2012):



В первые минуты/часы после внесения (под высоким давлением) жидкого БА в почву возможны его некоторые потери в газообразной форме. Величина этих потерь зависит, главным образом, от влажности почвы, ее гранулометрического состава и содержания ПОВ. Однако, как показал лабораторный опыт с десятью контрастно различающимися по свойствам почвами (в т.ч. по содержанию глинистых частиц от 2 до 75% и влажности от воздушно-сухого состояния до полной полевой влагоемкости), эти факторы не оказывали влияния на размеры потерь аммиака после его внесения и минимально проявлялись во всех тестируемых почвах (Barker, 1999). Впрочем, это не удивительно, поскольку безводный аммиак быстро поглощает любую влагу, имеющуюся в почве. Ряд авторов отмечают, что влага по сравнению с глиной и ПОВ не имеет критического значения для удержания аммиака в почве сразу после его внесения. Содержание влаги в почве необходимо лишь для быстрой и полной герметизации инъекционного канала и образующегося кратковременного резервуара аммиака в почве в момент его внесения (Angus et al., 2014). Полевые опыты с супесчаной почвой при трех контрастных уровнях влажности показали, что при внесении БА потери аммиака

происходят лишь в очень сухой почве за счет его быстрого переноса через трещины и поры. Размеры улетучивания аммиака из внесенного БА во влажную почву незначительны (Sommer, Christensen, 1992). Важное значение имеет глубина заделки БА и других ЖМУ в почву. Потери аммиака из почвы сразу после его внесения отсутствовали, если инъекцию безводного аммиака делали на глубину по крайней мере 5 см (Scheepers, Fox, 1989). Для сравнения, мочевины достаточно заделывать в почву на глубину 2,5 см чтобы избежать улетучивания аммиака (Bouwmeester et al., 1985).

В рассматриваемых нами черноземных почвах с высоким содержанием гумусовых веществ и наиболее часто имеющих средне- и тяжелосуглинистый гранулометрический состав, в периоды основного внесения удобрений (осень, весна) присутствует достаточно влаги для удержания безводного аммиака. Поэтому мы допускаем, что потери БА сразу после его применения не превышают 1% от внесенного азота.

Хемосорбция аммиака органическим веществом почвы представляет собой реакции NH_3 с различными функциональными группами гумусовых веществ, которые приводят к образованию азотсодержащих органических соединений, имеющих низкую растворимость, устойчивых как к экстракции сильными кислотами, так и термической обработке (Allison, 1973; Kissel et al., 2008). Эти реакции, в результате которых образуется ковалентно-связанный азот, могут протекать достаточно легко, не требуя особых условий (температура, давление). Наиболее реактивными с NH_3 являются органические соединения с функциональностью кетонов и хинонов. Промежуточным продуктом реакций могут быть ароматические соединения (в которых азот представлен аминогруппой) с двумя или более гидроксильными группами OH^- , после полимеризации которых образуются соединения с азотом, включенным в пяти- и шестичленные гетероциклические соединения (Lindbeck, Young, 1965; Broadbent, Stevenson, 1966; Thorn, Mikita, 1992). Отметим, что некоторые авторы (Kissel et al., 2008) при определении этого процесса называют его хемосорбцией или фиксацией почвенным органическим веществом, имея ввиду, что, помимо гумусовых веществ, ряд неспецифических органических соединений в почве (например, лигнин) также обладают способностью сорбировать аммиак. Учитывая недостаток информации на эту тему, мы используем эти термины (хемосорбция гумусовыми веществами и хемосорбция ПОВ) как синонимы.

Количество азота, сорбированного гумусовыми веществами, увеличивается при повышении pH более 7 ед., поскольку в этих условиях газообразный NH_3 становится более значимым компонентом пула аммиачного N (т.е. суммы газообразного NH_3 и растворенного NH_3 в почвенном растворе) (Kissel et al., 2008). При высоких концентрациях водного аммиака, обусловленных, в частности, внесением БА, а также в условиях повышенных температур и давления (способствующих переходу аммиака в газообразную фазу), относительно большее количество аммиака может быть сорбировано ПОВ (Allison, 1973).

В обзоре (Nommik, Vahtras, 1982) делается заключение, что в почвах с содержанием органического вещества около 2% и при внесении БА в количестве 100 кг N/га фиксация NH_3 гумусовыми веществами составляет менее 5% от внесенного N. Наиболее вероятно, авторы в этом случае учитывают хемосорбцию аммиака гумусовыми веществами непосредственно из аммиачных удобрений в первые минуты/часы после их внесения и хемосорбцию пула $[\text{NH}_3(\text{раств}) \text{ и } \text{NH}_4^+(\text{раств})]$ (см. следующий раздел). Разделяя хемосорбцию этих двух пулов азота, мы допускаем, что величина хемосорбции экзогенного азота непосредственно из БА может составлять около 2% в рассматриваемых нами черноземных почвах, имеющих существенно большее, чем 2% содержание ПОВ и характеризующихся слабокислой или нейтральной реакцией среды.

Сорбированный гумусовыми веществами аммиак становится доступен растениям только после его минерализации почвенными микроорганизмами. Биологическая доступность этого пула азота незначительно отличается от пула общего азота почвы (Nommik, Vahtras, 1982).

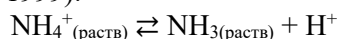
Физическая сорбция рассматривается как вторичная к хемосорбции и происходит в случае, когда высокие концентрации NH_3 превышают хемосорбционную способность почвы. Такие ситуации могут возникать кратковременно сразу после внесения безводного аммиака в почву. Причиной физической сорбции являются связи между атомами водорода NH_3 и атомами кислорода на поверхности глинистых минералов. Физическая адсорбция является относительно слабым механизмом удержания аммиака и весьма кратковременна (Kissel et al., 2008). В черноземных почвах с высоким содержанием гумусовых веществ и, следовательно, обладающих высоким потенциалом к хемосорбции, физическая сорбция, вероятно, незначительна.

Отметим также, что латеральное распространение экзогенного аммиачного азота от места внесения БА обычно составляет 6–7 см даже в различающихся по свойствам почвах, в редких случаях достигая 10–12 см (Nommik, Vahtras, 1982; Izaurralde et al., 1987; Norman et al., 1987; Kissel et al., 2008).

ПРОЦЕССЫ ПРИ ВНЕСЕНИИ В ПОЧВУ АММОНИЙНОГО АЗОТА

При внесении аммоний-содержащих соединений происходит их растворение в почвенном растворе и диссоциация на катион NH_4^+ и соответствующие анионы. Аммиак, образуемый, например, при гидролизе мочевины и/или внесенный с безводным аммиаком, составляет вместе с аммонием единый, наиболее лабильный пул азота в почвенном растворе: $[\text{NH}_3(\text{раств}) + \text{NH}_4^+(\text{раств})]$.

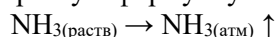
Ионы аммония находятся в химическом равновесии с аммиаком в водной фазе почвы (Stevenson, Cole, 1999):



Однако доля аммиака в пуле $[\text{NH}_3(\text{раств}) + \text{NH}_4^+(\text{раств})]$ крайне незначительна при pH почвенного раствора менее 7,5 (Kissel et al., 2008).

Аммонийный азот почвенного раствора вовлекается в следующие процессы: превращение в газообразный аммиак с последующим улетучиванием; обменная адсорбция глинистыми минералами; необменная фиксация глинистыми минералами; фиксация (хемосорбция) гумусовыми веществами; иммобилизация гетеротрофной почвенной микробиотой; поглощение корнями высших растений; нитрификация (Nommik, Vahtras, 1982; Norman et al., 1987; Benke et al., 2012). Первые четыре процесса являются абиотическими, а последующие три имеют биотическую природу.

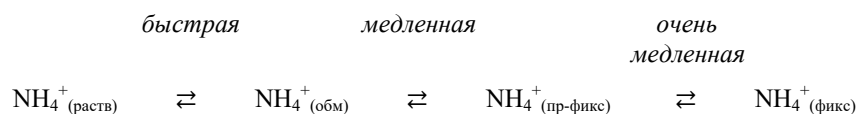
Водный аммиак почвенного раствора при определенных условиях может переходить в газообразную форму и улетучиваться из почвы:



Потери азота из почвы за счёт улетучивания аммония определяются, главным образом, концентрацией аммиака в растворе, кислотностью среды (Stevenson, Cole, 1999; Sigurdarson et al., 2018), а также температурой (Sommer et al., 2004; Kissel et al., 2008). В кислых и нейтральных почвах существенных потерь азота (как из удобрений, так и эндогенного азота) за счёт улетучивания аммония не происходит: потери в форме NH_3 составляют 1% от внесённого N при pH 7,3. При значениях pH более 7,0–7,3 химическое равновесие между NH_4^+ и $\text{NH}_3(\text{раств})$ смещается в сторону большего образования аммиака, приводя к существенным потерям N из удобрений, достигающим 10% от внесённого N при pH 8,3 и 50% – при pH 9,3 (Sigurdarson et al., 2018; Sawyer, 2019). Причём, скорость этого процесса довольно высока – основные потери происходят в первые часы/сутки после внесения удобрений (Benke et al., 2012). Зависимость величины потерь азота за счёт улетучиванию аммония от кислотности почвы подтверждена многими опытами. В инкубационном опыте с тремя почвами, имеющими величины pH от 5,9 до 6,5, потери азота в газообразной форме составили в среднем 2% от внесённого ^{15}N безводного аммиака через сутки после его внесения (Norman et al., 1987). Полагаем, что около половины этих потерь приходится на долю улетучивания аммония. На примере другого инкубационного опыта с десятью почвами, различающимися по ряду свойств, включая кислотность, установлено, что в среднем для четырех почв, pH которых не превышал 6,4 ед., через сутки после внесения БА в почву остаётся в среднем 90% внесённого азота в форме обменного аммония, а для остальных шести почв с pH от 7,9 до 8,3 значительно меньше – в среднем лишь 66% в форме NH_4^+ (Benke et al., 2012). Такая существенная разница между двумя группами почв несомненно обусловлена процессом улетучивания аммония.

Влияние температуры проявляется в увеличении доли аммиака в пуле $[\text{NH}_3(\text{раств}) + \text{NH}_4^+(\text{раств})]$. Так, в почве с pH 8,5 ед. только 5,5% этого пула присутствует в форме NH_3 при 10°C, в то время как при 40°C – 33% (Kissel et al., 2008).

Аммоний почвенного раствора участвует в реакциях динамического равновесия (Nommik, Vahtras, 1982):



где курсивом выделена относительная скорость реакций.

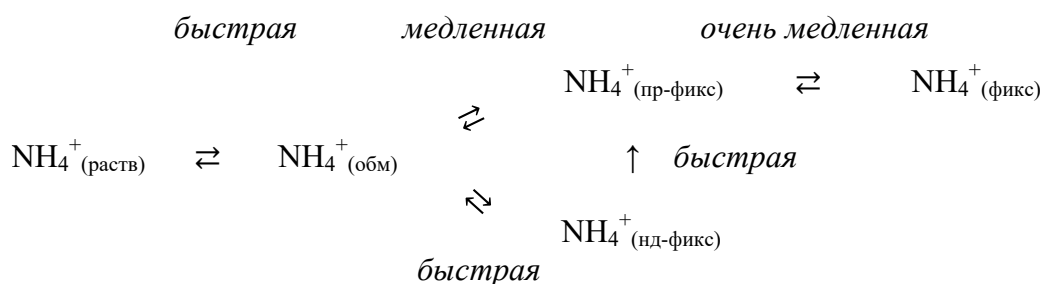
Обменная адсорбция катионов аммония почвенного раствора представляет собой реакцию NH_4^+ с обменными катионами, расположенными на поверхности глинистых минералов и органо-минеральных коллоидных частиц почвы, несущих, преимущественно, отрицательные электрические заряды. В решетках глинистых минералов эти заряды возникают при изоморфном замещении Si и Al на, соответственно, Al и Mg, а также при диссоциации H^+ из -ОН групп, связанных с Si и/или Al. В органическом веществе почвы отрицательные заряды возникают в результате диссоциации карбоксильных -COOH и фенольных -ОН групп. Между заряженными катионами NH_4^+ и противоионами устанавливается, преимущественно, ионная связь (основанная на электростатическом притяжении ионов), а также могут иметь место не-кулоновские взаимодействия (Nommik, Vahtras, 1982). Благодаря этому формируется важнейший пул почвенного азота – обменный или обменно-поглощенный аммоний, который (наряду с аммонием почвенного раствора), во-первых, хорошо поглощается высшими растениями и, во-вторых, играет ключевую роль в процессах внутрипочвенного цикла азота, осуществляемых микроорганизмами.

Необменная фиксация аммония осуществляется трехслойными глинистым минералами типа 2 : 1, относящимися к трем группам: монтмориллонит, вермикулит, слюда/иллит. Кристаллическая решетка этих алюмосиликатных минералов состоит из двух кремнекислородных (Si – O) тетраэдрических слоев (сеток) и одного, заключенного между ними, алюмогидроксильного (Al – O – OH) октаэдрического слоя, образующих вместе, так называемый, пакет. У трехслойных минералов, в отличие от двухслойных минералов каолиновой группы, межпакетные пространства достаточно большие, связь между пакетами непрочная – при повышении влажности растворенные ионы входят в межпакетные промежутки.

Катионы NH_4^+ , адсорбированные на поверхности минералов, как уже отмечено выше, являются обменными, а в межпакетных пространствах определяются как (необменно-)фиксированные. Кроме этого, выделяют пул «природно-фиксированного аммония» (native fixed NH_4^+) и «промежуточного NH_4^+ » (intermediate NH_4^+) (Kowalenko, Ross, 1980; Nommik, Vahtras, 1982). Для целей нашего обзора важен последний из этих двух упомянутых пулов, представляющих собой катионы аммония, занимающие пространства между пакетами глинистых минералов, находящихся в процессе разрушения (Nommik, Vahtras, 1982), а также, вероятно, на боковых сколах минералов и краевых клинообразных расширенных межпакетных промежутков (по аналогии с фиксированными катионами калия) (Якименко, 2011). В соответствии с реакциями динамического равновесия обмен промежуточного NH_4^+ на катионы со сходными ионными радиусами, такими как K^+ или H^+ , может быть проще/быстрее, чем природно-фиксированного NH_4^+ (Nommik, Vahtras, 1982).

В пионерских работах В.Н. Кудеярова и его аспирантов, посвящённых необменному/фиксированному аммонiu, ещё в начале 70-х годов прошлого века была изучена динамика содержания необменного аммония в почвах, показана важность этого азотного пула в азотном цикле (особенно в почвах с высоким содержанием глинистых минералов), а также необходимость учёта необменного аммония в питании растений и планировании системы азотных удобрений (Башкин, 1974).

В исследованиях (Kowalenko, Ross, 1980; Nieder et al., 2011) установлено, что фиксированный аммонийный азот из недавно внесённых N удобрений [NH_4^+ (нд-фикс)] более доступен растениям и, следовательно, способен к дефиксации в значительно большей степени, чем природно-фиксированный аммоний. Фиксация NH_4^+ из свежеснесённых удобрений, вероятно, может происходить в тех же межпакетных пространствах, что и для промежуточного NH_4^+ (Nommik, Vahtras, 1982). Учитывая высокую скорость, с которой аммонийный азот удобрений трансформируется в фиксированный азот (о чем будет сказано далее), приведённое выше уравнение динамического равновесия, вероятно, более корректно будет записать следующим образом:



Фиксация/хемосорбция аммонийного азота гумусовыми веществами, по сути, является тем же процессом, что и в отношении аммиачного азота (механизмы которого описаны в предыдущем разделе), поскольку, фактически, в реакцию с почвенным органическим веществом вступает аммиак, а не ион аммония (Allison, 1973). Фиксация аммонийного азота может происходить благодаря обратимым реакциям между NH_4^+ _(раств) и NH_3 _(раств) с образованием аммиака.

Скорость приведенных выше абиотических и биотических процессов потребления ионов аммония определяется, главным образом, количеством и качеством глинистых частиц и ПОВ, режимом влажности, насыщенностью основаниями, кислотностью и взаимодействием между этими показателями свойств почв (Kowalenko, Ross, 1980; Drury, Beauchamp, 1991; Trehan, 1996; Kissel et al., 2008; Benke et al., 2012). Под качеством глинистых частиц подразумевается их минералогический состав, а под качеством ПОВ – доля его легкоразлагаемой фракции и соотношение C/N.

По поводу соотношения скорости биотических и абиотических процессов потребления NH_4^+ имеются противоречивые сведения. Ряд исследователей приводят данные, что микробное поглощение неорганических и органических соединений азота начинается в течение нескольких минут/часов или дней после их внесения (Trehan, 1996; Jones et al., 2013; Wilkinson et al., 2014). Однако другие авторы полагают, что именно абиотические процессы фиксации (включая хемосорбцию гумусовыми веществами) являются главным механизмом, объясняющим быстрое расходование NH_4^+ в первые сутки после добавления этого субстрата в почву (Nommik, Vahtras, 1982; Nieder et al., 2011; Cavalli et al., 2015). Многими авторами установлено, что необменная фиксация внесенного аммония глинистыми минералами происходит очень быстро – в короткий временной интервал (от нескольких часов до 2 суток как максимум) (Sippola et al., 1973; Kowalenko, Cameron, 1976; Opuwaribo, Odu, 1978;). Например, в опытах с двумя почвами, различающимися по содержанию глинистых частиц, их минералогическому составу и, следовательно, способности к фиксации аммония, около 50% его фиксации происходило в течение 6 часов после его внесения и почти 100% – в течение первых 3 дней в обеих почвах (Drury, Beauchamp, 1991). В другом опыте с контрастными по содержанию глины почвами количество NH_4^+ _(нд-фикс) за первые сутки составило 72% от фиксированного в течение 10 дней (Trehan, 1996). Температура не влияла на скорость фиксации экзогенного азота (Drury, Beauchamp, 1991).

Содержание недавно-фиксированного аммония остается неизменным в течение первых примерно 25 дней после внесения N удобрений, но в последующие 20–30 дней снижается на 25% после того, как весь внесенный с удобрениями аммоний нитрифицируется (Sowden, 1976). Т.е. при истощении пула обменного аммония часть NH_4^+ _(нд-фикс) переходит в NH_4^+ _(обм) в соответствии с приведенными выше обратимыми реакциями динамического равновесия между пулами NH_4^+ . Скорость высвобождения (дефиксации) NH_4^+ _(нд-фикс) значительно ниже, чем скорость его фиксации (Kowalenko, Cameron, 1976; Sowden, 1976; Drury, Beauchamp, 1991). В условиях, когда истощение пула обменного аммония в почве не происходит, количество недавно фиксированного NH_4^+ остается неизменным в течение длительного времени (Norman et al., 1987), что хорошо продемонстрировано на рисунке (рис.1).

Исходя из природы фиксации аммония, очевидна тесная корреляционная связь между содержанием глины и количеством природно-фиксированного аммония (Хамова, 1982; Якименко, 2011; Kissel et al., 2008). Также понятен феномен, что почвы с более высоким содержанием глины фиксируют больше аммония из свежевнесенных удобрений. Например, в инкубационных опытах с внесением меченого ^{15}N сульфата аммония, размеры его фиксации составили менее 1% от внесенного экзогенного N в почвах с содержанием глины 6 и 12%, около 3% – в почве, имеющей 23% глинистой фракции и 31% от внесенного – в почве, содержащей 47% глины (Jensen et al., 1989). В другом лабораторном опыте с внесением меченого ^{15}N сульфата аммония, среднее (за период 1–10 день инкубации) количество необменно-фиксировано экзогенного азота равнялось 1,4% от внесенного N в почве с содержанием глины 15% (при pH 5,8, $\text{C}_{\text{орг}}$ 1,1%) и 23,4 % от внесенного – в почве с содержанием глины 53% (при pH 6,9, $\text{C}_{\text{орг}}$ 7,0%) (Trehan, 1996). По результатам этих двух опытов мы рассчитали эмпирическую зависимость между содержанием глинистой (<2 мкм) фракции и NH_4^+ _(нд-фикс), выраженного в % от внесенного количества экзогенного N:

$$\text{NH}_4^+_{(\text{нд-фикс})} = 0,49 \times \text{Exp}(0,08 \times \% \text{ глины}),$$

где 0,49 и 0,08 – коэффициенты уравнения нелинейной регрессии, достоверные при 1% уровнях значимости. Коэффициент детерминации полученного уравнения равен 0,975, а корреляции – 0,988.

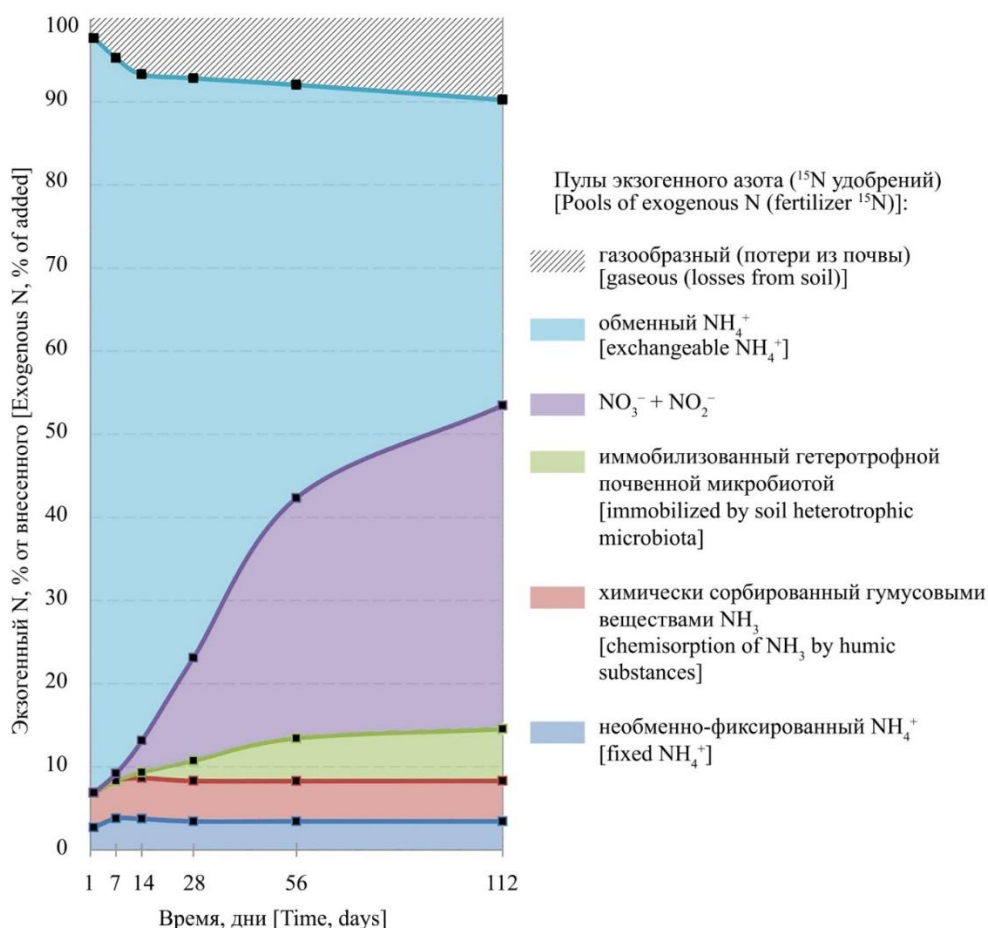


Рисунок 1. Динамика пулов экзогенного азота (^{15}N удобрений) в инкубационном опыте R.J. Norman с соавторами (Norman et al., 1987) в среднем для трех различающихся по свойствам почв. Используемые в инкубационном опыте почвы характеризовались следующими свойствами: водный pH от 5,9 до 6,5 ед., $\text{C}_{\text{орг}}$ от 3,0 до 0,8%, N общий от 0,24 до 0,08%, гранулометрический состав – от средне- до тяжелосуглинистого.

В цитируемых выше результатах инкубационного опыта (Jensen et al., 1989), в почве с высоким содержанием глины (47%) содержание природно-фиксированного аммония достигало значительной величины – 10% от общего содержания азота. В наиболее распространенных подтипах агрогенных черноземов Восточно-Европейской равнины содержание природно-фиксированного аммония в верхнем слое почвы варьирует в узких пределах – от 3 до 5% от общего N (Завалин и др., 2018) и практически столько же в Западной Сибири – от 3 до 6% от общего N (Гамзиков, 1981). Учитывая, что преобладающее большинство рассматриваемых нами черноземных почв содержит 20–40% глинистой фракции (<2 мкм), то в соответствии с полученным уравнением регрессии (1) следует ожидать размеры необменной фиксации аммония ($\text{NH}_4^+_{\text{нд-фикс}}$) в этих почвах от 2,3% до 11,5% (в среднем 5,2%) от внесённого N.

В инкубационном опыте с тремя различающимися по свойствам почвами (с содержанием углерода POV от 0,8 до 3,0%, глинистых частиц – от 12 до 31%, pH – от 5,9 до 6,5) через сутки после внесения меченого ^{15}N безводного аммиака экзогенный NH_4^+ , фиксированный глинистыми минералами, составил в среднем 3% внесённого N (от 1 до 4% в различных почвах), а сорбированный гумусовыми веществами – в среднем 4% внесённого N (от 3 до 6%) (Norman et al., 1987). В дальнейшем эти величины практически не изменяются на протяжении 112 дней проведения эксперимента (рис. 1).

Размеры хемосорбции аммония гумусовыми веществами при внесении меченого ^{15}N сульфата аммония в двух разных по свойствам почвах изучали в специальном лабораторном опыте с применением автоклавирования для стерилизации почвы. Установлено, что в почве с высоким содержанием POV (7,0% $\text{C}_{\text{орг}}$, pH 6,9 и 53% глины) среднее за период 1–10 дней инкубации количество абиотически сорбированного гумусовыми веществами аммония составило 4,8% от внесённого, а в почве с низким содержанием POV (1,1% $\text{C}_{\text{орг}}$, pH 5,8 и 15% глины) – 1,4%. Скорость хемосорбции в

обеих почвах можно охарактеризовать как очень высокую: за первые сутки сорбировалось 86–94% NH_4^+ от общего количества сорбированного аммония в течение 10 дней (Trehan, 1996).

В опытах с двумя почвами, содержащими 2,1–3,2% $\text{C}_{\text{орг}}$ и 31–36% глинистой фракции, сумма экзогенного не-экстрагируемого азота (т.е. необменно-фиксированного глинистыми минералами, сорбированного гумусовыми веществами и иммобилизованного микробиотой) быстро достигала своего максимума и уже через три первых дня после внесения удобрений достоверно не изменялась со временем для обоих типов почв во всех вариантах опыта (Drury, Beauchamp, 1991). Почти половина (45%) не-экстрагируемого азота объясняется необменной фиксацией глинистыми минералами и составляет в среднем для двух почв 3,9% от внесённого экзогенного азота; оставшиеся 55% не-экстрагируемого азота соответствовали в среднем 4,8% от внесённого N. Учитывая относительно быструю скорость хемосорбции гумусовыми веществами и относительно медленную скорость иммобилизации почвенной микробиотой (Drury, Beauchamp, 1991), полагаем, что для временного интервала 7–10 дней после внесения удобрений полученная величина расходования NH_4^+ (4,8% от внесённого N) обусловлена, преимущественно, абиотическим процессом – сорбцией гумусовыми веществами.

Большой объем исследований необменной фиксации азота удобрений в полевых опытах с яровой пшеницей выполнен Г.П. Гамзиковым с соавторами (Гамзиков, 1981; Гамзиков и др., 1985) на различных почвах в южной части Западной Сибири. В серии опытов на трех типах почв, закрепление азота в почве за счёт необменной фиксации в конце вегетационного периода составило в среднем 4,2% (от 2,6 до 5,5%) от внесённого азота в амидной форме (Гамзиков, 1981); в серии 4-летних опытов, также на трех типах почв, количество необменно-фиксированного экзогенного азота достигало в среднем 3,8% (от 1,2 до 8,0%) от внесённого (Гамзиков и др., 1985). Учитывая, что со временем после внесения удобрений содержание экзогенного азота снижается на 25% (Sowden, 1976), можно рассчитать, что в первые дни (7–10 суток) после внесения удобрений процесс необменной фиксации отвечает за расходование в среднем 5,3% внесённого N в первой серии опытов и 4,8% – во второй серии. В других опытах на двух типах почв количество фиксированного NH_4^+ определяли в течение вегетационного сезона. Усреднённые за сезон размеры фиксации составили 3,2 и 7,3% от внесённого или в среднем для обоих типов почв – 5,2% (Гамзиков и др., 1985).

Таким образом, для различных почв и вариантов внесения аммонийных удобрений получены следующие средние размеры фиксации аммонийного азота в инкубационных опытах: 9% (1–31%) от внесённого (Jensen et al., 1989), 12% (1,4–23,4%) (Trehan, 1996); 5,2% (2,3–11,5%) (рассчитано нами по уравнению (1) на основе данных E.S. Jensen et al. (1989) и S.P. Trehan (1996)); 3% (1–4%) (Norman et al., 1987); 3,9% (Drury, Beauchamp, 1991); а в полевых опытах: 5,3% (3,3–6,9%) от внесённого (Гамзиков, 1981); 4,8% (1,5–10,0%) (Гамзиков и др., 1985); 5,2% (3,2–7,3%) (Гамзиков и др., 1985). Средние для различных почв размеры хемосорбции гумусовыми веществами составили в разных экспериментах 4% внесённого N (Norman et al., 1987); 2,5% (Trehan, 1996) и 4,8% (Drury, Beauchamp, 1991).

Учитывая, что черноземные почвы имеют слабокислую и нейтральную реакцию среды, считаем, что потери азота за счет улетучивания аммония составляют не более 1% от внесённого азота удобрений. Обобщая результаты рассмотренных выше экспериментов и учитывая связь между содержанием природно-фиксированного аммония и количеством фиксированного NH_4^+ из свежеснесённых удобрений допускаем, что в черноземных почвах средне- и тяжелосуглинистого гранулометрического состава размеры необменной фиксации глинистыми минералами составляют около 5%, а хемосорбции – 4% от внесённого экзогенного азота. Все процессы протекают быстро и достигают своих максимальных значений в течение первых суток после внесения аммонийных удобрений.

ТРАНСФОРМАЦИЯ АММОНИЙНОГО АЗОТА В НИТРАТНЫЙ АЗОТ

Наиболее важным процессом (с точки зрения количества трансформированного азота), происходящим с NH_4^+ почвенного раствора и обменным NH_4^+ , является нитрификация – процесс биологического окисления аммиака/аммония до нитратов.

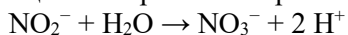
Трансформация аммонийного азота при автотрофной нитрификации происходит в две фазы (Norton, 2008):

(1Ф) В первой фазе аммоний-окисляющие бактерии (такие как *Nitrosomonas* и/или *Nitrosospira*) превращают аммоний в гидроксилламин с помощью фермента аммоний-монооксигеназы, а дальнейшая трансформация аммония в нитраты катализируется ферментом гидроксилламин-оксиредуктазы:

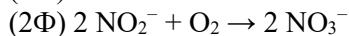
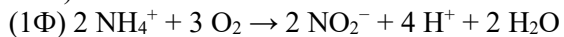


Кроме вышеупомянутых бактерий, в настоящее время известны аммоний-окисляющие археи (Nitrososphaera), также осуществляющие окисление аммония до нитритов (Norton, Ouyang, 2019).

(2Ф) Во второй фазе нитрит-окисляющие бактерии (такие как Nitrobacter и/или Nitrospira) превращают нитриты в нитраты с помощью фермента нитрит-оксиредуктазы:



Уравнения первой и второй фаз нитрификации иногда записывают следующим образом (Benke et al., 2012):



В последние десятилетия открыты и другие пути трансформации соединений азота до нитритов и нитратов. Например, comammox – полное окисление аммония, осуществляемое некоторыми бактериями класса Nitrospira (Strong et al., 1999). Однако окисление аммиака и нитритов хемолитотрофными бактериями и археями признается в настоящее время основным механизмом нитрификации в сельскохозяйственных почвах (Norton, 2008).

Ведущими факторами, определяющими скорость нитрификации в почвах, являются температура, влажность, pH, концентрация субстрата ($\text{NH}_4^+/\text{NH}_3$), уровень CO_2 и O_2 (аэрация) (Drury, Beauchamp, 1991; Norton, 2008; Fuka et al., 2009). Гранулометрический состав имеет незначительное влияние на нитрификацию (Strong et al., 1999); лишь в песчаных почвах с низким содержанием ПОВ отмечается крайне низкая скорость протекания этого процесса (Barth et al., 2020). Скорость нитрификации резко замедляется при высокой влажности почвы (при полной полевой влагоемкости), что обусловлено недостатком O_2 , необходимого для этого процесса (Schmidt, 1982; Norton, 2008). В отношении кислотности почвы, большинство авторов отмечают близкий интервал оптимальной кислотности для обеих фаз нитрификации: 6,5–7,5 ед. pH (Norton, 2008), 6–8 ед. pH (Schmidt, 1982), 6,9–7,7 ед. pH (Sahrawat, 1982), 7,5 ед. pH (Sahrawat, 2008). В качестве нижнего предела для осуществления нитрификации указывают 5 ед. pH (Sahrawat, 1982; Kyveryga et al., 2004) или даже 4 ед. pH (Schmidt, 1982).

В цитируемом выше лабораторном эксперименте (Norman et al., 1987) с тремя различными почвами, через сутки после внесения удобрений в среднем 91% экзогенного N оставалось в форме обменного аммония и лишь 9% трансформировалось в другие соединения (газообразный азот, фиксированный глинами и сорбированный гумусовыми веществами). Со временем, через одну неделю проведения опыта, содержание обменного аммония снижается благодаря необменной фиксации (достигающей своего максимального значения в эту дату) и нитрификации, а также за счет небольших газообразных потерь. Через 2, 3 и 8 недель уменьшение содержания обменного аммония в почве происходит в среднем на 84% (83,6–84,9%) за счёт нитрификации и лишь на 16% (15,1–16,4%) за счет его иммобилизации почвенной микробиотой (рис. 1). Существенного увеличения газообразных потерь экзогенного азота за это время не происходит. В инкубационном опыте с внесением мочевины также отмечается очень быстрая скорость трансформации амидного азота в нитраты при благоприятных условиях (температура, аэрация, близкая к нейтральной реакция среды) (Ghaly, Ramakrishnan, 2013). Очевидно, что соотношение скорости нитрификации и иммобилизации зависит от вышеупомянутых факторов, обуславливающих активность нитрифицирующих микроорганизмов. Для процесса иммобилизации, осуществляемого, преимущественно, хемоорганотрофными микроорганизмами, важно наличие в почве достаточного количества легкоразлагаемого углеродистого субстрата, в отличие от нитрификаторов – хемолитотрофов по типу питания. Кроме того, скорость этих процессов может различаться в инкубационных опытах и полевых условиях.

В длительных полевых опытах на пылеватых тяжелосуглинистой и средне-глинистой почвах с нейтральной кислотностью (Центральная Калифорнийская Долина), при двух системах земледелия – традиционной (с минеральными удобрениями) и с внесением в почву большого количества органического вещества (навоз и растительные остатки) определяли скорости процессов цикла азота при использовании меченых ^{15}N удобрений в течение вегетационного сезона. Получено, что скорость иммобилизации почвенной микробиотой нитратного N составляла 32–35% от общей скорости нитрификации при традиционной системе земледелия и 37–46% – даже при внесении больших доз легкоразлагаемого органического вещества (Burger, Jackson, 2003). Сделан вывод, что в обеих почвах гетеротрофные микроорганизмы ассимилируют меньше аммонийного азота, чем нитратного из-за низкого содержания пула NH_4^+ , что связано с его быстрым истощением за счёт нитрификации. В опытах с применением аммиачных и аммонийных удобрений на различных пахотных почвах установлено, что общая скорость нитрификации может достигать своих потенциальных

(максимальных) значений в течение 3 дней, увеличиваясь с 0,3 до 8,0 мг N кг⁻¹ день⁻¹ (Mendum et al., 1999). J.M. Norton (2008) в своем обзоре приходит к аналогичному заключению: в большинстве сельскохозяйственных почв значительная доля обменного NH₄⁺ быстро трансформируется в NO₃⁻. Очевидно, что нитрифицирующие микроорганизмы являются более конкурентно способными за аммонийный N, по сравнению с гетеротрофной почвенной микробиотой, иммобилизующей эту форму азота.

В отношении температуры, для различных почвенно-климатических условий получены отличающиеся данные, демонстрирующие максимальную скорость нитрификации при 20–25°C, 30–40°C и даже 40°C, что вероятно обусловлено адаптацией нитрифицирующих микроорганизмов к температурным режимам разных почв (Schmidt, 1982). Тем не менее, наиболее благоприятной температурой для нитрификации в настоящее время считается диапазон от 25 до 30°C. При понижении температуры от 25 до 5°C скорость нитрификации постепенно снижается (Norton, 2008; Russell et al., 2002). Температура 5°C, по-видимому, является нижним пределом, при котором аммоний трансформируется в нитраты в каких-то существенных количествах (Anderson, 1960; Addiscott, 1983).

Мы рассчитали коэффициент температурного ускорения Q₁₀ (правило Вант-Гоффа) по убыли обменного аммония в почве после внесения аммонийного N на основании экспериментальных данных лабораторного опыта со среднесуглинистой старопахотной почвой, получавшей минеральные удобрения длительное время (опыт Rothamsted experimental station, Великобритания) (Addiscott, 1983). Поскольку опыт инкубационный, поглощения аммонийного N растениями не происходило. Так как необменная фиксация аммония глинистыми минералами и фиксация аммиака гумусовыми веществами происходят, преимущественно, в первые часы/сутки после внесения удобрения, то эти процессы не оказывают существенного влияния на превращения внесенного аммония в почву в период 2–3 недели после внесения удобрений. Как показали опыты R.J. Norman с соавторами (Norman et al., 1987), за 2–3 недели количество иммобилизованного почвенной микробиотой аммонийного азота составляло не более 16% от общей убыли аммонийного азота, а в первую неделю иммобилизации экзогенного азота не происходила (рис. 1). Таким образом, мы полагаем, что за первые 7–10 дней после внесения удобрений убыль обменно-поглощенного аммония в почве в этом опыте (Addiscott, 1983) обусловлена, главным образом, нитрификацией (на 90%). Рассчитанные нами коэффициенты температурного ускорения Q₁₀ для скорости нитрификации (по убыли обменного аммония) составили при повышении температуры:

$$Q_{10} \text{ от } 10 \text{ до } 20^{\circ}\text{C} = 2,6;$$

$$Q_{10} \text{ от } 5 \text{ до } 15^{\circ}\text{C} = 2,3;$$

$$Q_{10} \text{ от } 2,5 \text{ до } 10^{\circ}\text{C} = 2,1.$$

Расчёт последнего коэффициента является условным, т.к. разница температур составляет 7,5°C (а не 10°C) и при 2,5°C окисление аммонийного азота до нитратов происходило не полностью, замедляясь при снижении концентрации NH₄⁺ по сравнению с его исходным содержанием.

Коэффициент температурного ускорения при изменении температуры на 5°C обычно не употребляется, однако, для практических целей, считаем полезным его рассчитать. Мы получили следующие коэффициенты температурного ускорения при повышении температуры на 5°C:

$$Q_5 \text{ от } 15 \text{ до } 20^{\circ}\text{C} - Q_5 = 1,6;$$

$$Q_5 \text{ от } 10 \text{ до } 15^{\circ}\text{C} - Q_5 = 1,6;$$

$$Q_5 \text{ от } 5 \text{ до } 10^{\circ}\text{C} - Q_5 = 1,4;$$

$$Q_5 \text{ от } 2,5 \text{ до } 5^{\circ}\text{C} - Q_5 = 1,5.$$

В большинстве почв скорость второй фазы нитрификации выше, чем первой, поэтому нитриты обычно присутствуют в почвах в следовых количествах (Norton, 2008). Имеются данные, что при низких температурах происходит накопление нитритного азота в почве, что свидетельствует о большей чувствительности к пониженным температурам у нитрит-окисляющих бактерий (2-ая фаза нитрификации), чем у аммоний-окисляющих микроорганизмов (1-ая фаза нитрификации). Однако, эти данные весьма противоречивы: в одних исследованиях критической температурой, при которой происходит накопление нитритов, выявлена температура ниже 12°C (Russell et al., 2002), у других исследователей – 2°C (Justice, Smith, 1962), третьи авторы не наблюдали замедления 2-ой фазы нитрификации при температуре 4°C (Macduff, White, 1985).

Для рассматриваемых нами черноземных почв, которые крайне редко находятся в переувлажненном состоянии (т.е. хорошо аэрированы), имеют, в основном, нейтральную реакцию среды и содержат высокое количество субстрата (NH₄⁺/NH₃) после применения азотных удобрений, температура остаётся наиболее важным фактором, контролирующим скорость нитрификации.

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ПРОЦЕССОВ ТРАНСФОРМАЦИИ АЗОТА УДОБРЕНИЙ В ЧЕРНОЗЕМНЫХ ПОЧВАХ В ПЕРВЫЕ СУТКИ ПОСЛЕ ИХ ВНЕСЕНИЯ

В почвах, близких по свойствам к автоморфным почвам черноземного ряда Западной и Средней Сибири, Восточно-Европейской равнины, не все из вышеперечисленных процессов имеют место или, по крайней мере, сколь-либо значимы в количественном выражении. Процессы, характерные для черноземных почв представлены на рисунке 2, где приводится экспертная оценка количественного выражения этих процессов при условии основного допосевного или припосевного способов внесения удобрений в поздневесенний период (май). Для удобства использования результатов настоящего обобщения в практических целях на рисунке 2 представлены средние значения, а не их диапазон. Исходя из цели нашего обзора, основное внимание уделено процессам трансформации азота, происходящим, преимущественно, в первые сутки (7–10 дней) после внесения удобрений, которые отмечены на рисунке 2 красными линиями/стрелками. Цифры красного цвета возле стрелок показывают количества трансформируемого азота, выраженные в % от внесённого N соответствующих удобрений. Процессы, происходящие с азотом обменного аммония и растворенных аммиака и аммония в последующие 3–4 недели после внесения удобрений, отмечены на рисунке синими линиями, а цифры синего цвета отражают соответствующие величины процессов трансформации в процентах от общего размера этого пула. Процессы, происходящие с нитратным и аммонийным азотом, которые не рассматриваются подробно в нашем обзоре, а лишь упоминаются – отмечены зелёными линиями; эти процессы происходят медленно и становятся количественно значимыми приблизительно через месяц после внесения удобрений (рис. 2).

Полагаем, что в случае допосевного применения аммиачных, аммонийных и амидных удобрений в осенний период, с внесённым азотом будут происходить те же процессы и приблизительно в том же количественном выражении, что и при поздневесеннем сроке применения удобрений. Основные различия будут в скорости протекания этих процессов, поскольку при низких температурах (наблюдаемых поздней осенью, зимой и ранней весной) все микробиологические и даже химические процессы либо затухают, либо протекают с крайне низкой скоростью.

Подчеркнём, что приведенные на рисунке 2 величины процессов трансформации азотных удобрений можно использовать в качестве ориентировочных значений при внесении этих форм индустриального азота в наиболее часто встречающихся автоморфных агрогенно-преобразованных черноземных почвах с гранулометрическим составом от легкосуглинистого до легкоглинистого и актуальной кислотностью от слабокислой до нейтральной, что характерно для подавляющего большинства старопахотных почв черноземного пояса России. В почвах с иными характеристиками (супесчаный, глинистый и тяжелоглинистый гранулометрический состав; слабощелочная и щелочная реакция среды с $\text{pH} > 7,3$; высокое, более 15%, содержание органического вещества; анаэробные условия в период после внесения удобрений; температурный и водный режим, отличающийся от гидротермических условий лесостепной и степной биоклиматических зон) величины скорости процессов трансформации экзогенного азота будут отличаться от значений, приведённых на рис. 2.

Образующиеся при нитрификации ионы NO_3^- , в дальнейшем принимают участие в других процессах азотного цикла, таких как: поглощение корнями растений с последующей ассимиляцией; иммобилизация гетеротрофной почвенной микробиотой; денитрификация и хемоденитрификация (процессы, приводящие к восстановлению нитратов до молекулярного азота и его оксидов); выщелачивание (нисходящая миграция нитратов за пределы почвенного профиля до грунтовых вод). Эти процессы происходят медленнее, чем упомянутые выше и становятся значимыми в количественном выражении (в % от внесённого N) приблизительно через месяц после внесения удобрений.

Рассмотрение этих процессов находится за пределами нашего обзора. Отметим лишь, что потери экзогенного азота за счёт выщелачивания нитратов в черноземных почвах незначительны. Для почв южной части Западной Сибири установлено, что даже в годы с повышенной влажностью экзогенный азот остаётся в почвенном профиле (Гамзиков, 2013). Некоторые черноземные почвы (оподзоленные и выщелоченные), хотя и имеют периодически промывной тип водного режима, но, как правило, в весенний период после внесения удобрений эти почвы не промываются и выщелачивание нитратов маловероятно. В случае осеннего внесения аммиачных, аммонийных и амидных удобрений, трансформация этих форм азота в нитраты происходит с крайне низкой скоростью, поэтому в период снеготаяния экзогенный азот все ещё присутствует в почве в аммонийной форме и его вымывания из почвенного профиля до грунтовых вод не происходит.

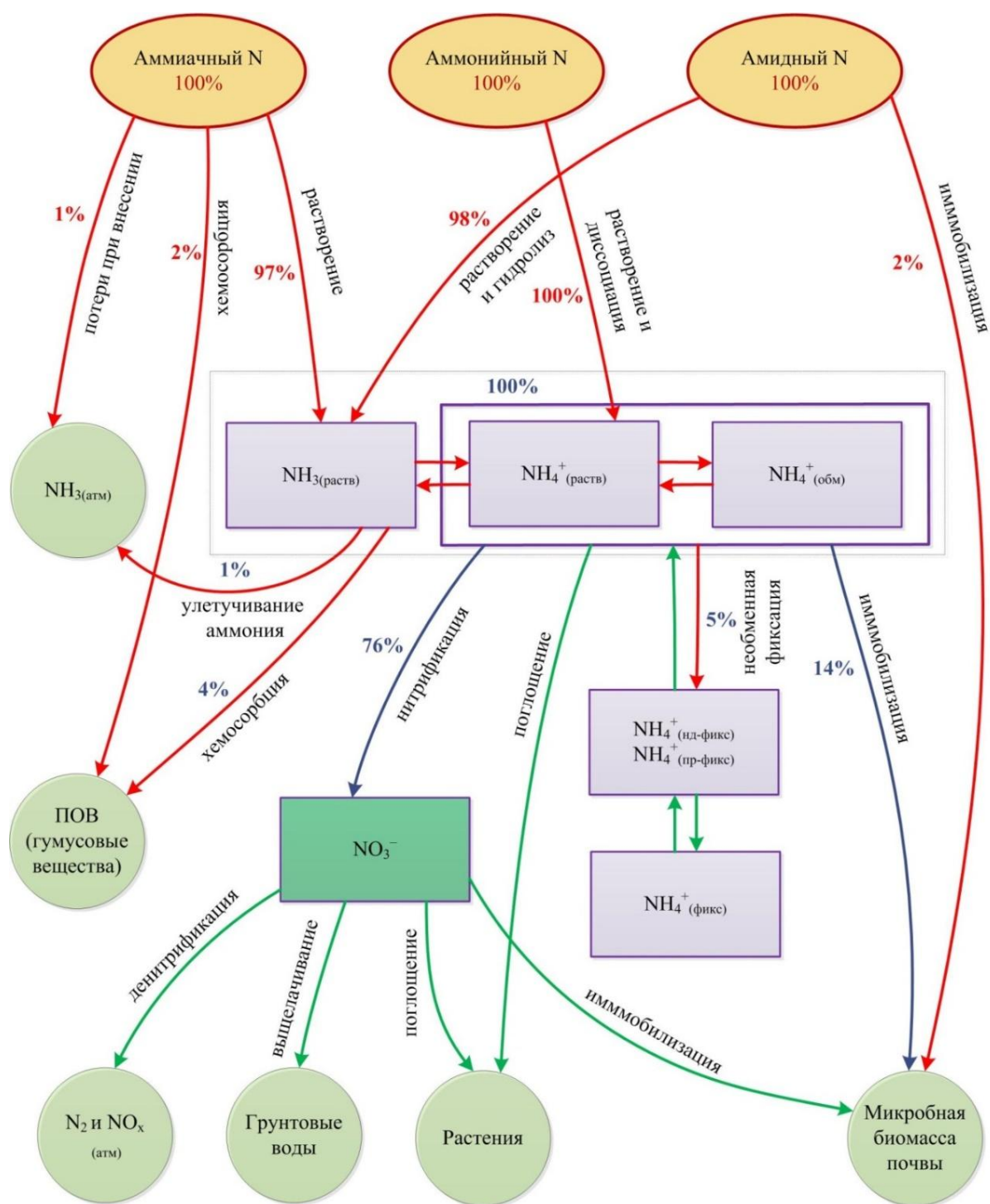


Рисунок 2. Основные процессы трансформации азотсодержащих удобрений и их интенсивность в первые сутки после внесения в черноземные почвы при использовании удобрений до или при посеве в поздневесенний период (3-я декада апреля, первая половина мая). Рисунок П.А. Барсукова.

Обозначения. Красные линии/стрелки обозначают «быстрые» процессы, происходящие в первые часы и сутки (7–10 дней) после внесения удобрений. Цифры красного цвета возле стрелок показывают размеры трансформируемого азота, выраженные в % от количества внесённого N соответствующих удобрений. Синие линии/стрелки обозначают относительно «медленные» процессы, происходящие с азотом пула $\text{NH}_3 + \text{NH}_4^+$ (состоящего из обменного аммония и растворенных аммиака и аммония) в последующие 3–4 недели после внесения удобрений, а цифры синего цвета отражают соответствующие величины процессов трансформации в процентах от общего размера этого пула. Зелёными линиями отмечены ещё более «медленные» процессы, происходящие с нитратным и аммонийным азотом, которые не рассматриваются подробно в нашем обзоре.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Увеличивающиеся темпы применения промышленных азотных удобрений привели к удвоению потоков азота в глобальном биогеохимическом цикле, трансформировав его в агрогеохимический, сопровождаемый рядом негативных экологических последствий. Для снижения этих последствий, с одной стороны, и повышения окупаемости удобрений растительной продукцией, с другой стороны, необходимо анализировать **эффективность использования азота (ЭИА)**, или в англоязычной литературе – Nitrogen Use Efficiency) в агроэкосистемах (Башкин, 2022). Одним из важных видов оценки ЭИА является учёт интенсивности процессов трансформации азотных удобрений при их внесении.

Трансформация аммиачных, аммонийных и амидных удобрений в почве в первые недели после их внесения происходит за счёт большого набора процессов физической, химической, физико-химической и микробиологической природы.

При внесении амидного азота (мочевины, КАС) происходит:

- растворение $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ в почвенном растворе;
- гидролиз $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ с образованием NH_3 ;
- превращение растворенного NH_3 в ионы NH_4^+ ;
- поглощение и иммобилизация аминогруппы $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ почвенной микробиотой.

При внесении аммиачного азота (безводного аммиака) происходит:

- диффузия NH_3 в свободные поровые пространства почвы;
- физическая сорбция NH_3 на поверхности почвенных частиц;
- хемосорбция NH_3 гумусовыми веществами;
- растворение NH_3 в почвенном растворе;
- превращение растворенного NH_3 в ионы NH_4^+ .

При внесении аммонийного азота (сульфата аммония, аммонийной селитры, КАС) происходит:

- растворение аммоний-содержащих соединений в почвенном растворе и их диссоциация на NH_4^+ и соответствующие анионы;
- превращение в газообразный NH_3 с последующим улетучиванием;
- превращение в газообразный NH_3 с последующей хемосорбцией гумусовыми веществами;
- обменная адсорбция глинистыми минералами;
- необменная фиксация глинистыми минералами;
- поглощение и иммобилизация гетеротрофной почвенной микробиотой;
- поглощение корнями растений (ассимиляция растениями);
- нитрификация.

Нитратный азот участвует в следующих процессах цикла азота:

- поглощение и иммобилизация гетеротрофной почвенной микробиотой;
- поглощение корнями растений (ассимиляция растениями);
- денитрификация;
- хемоденитрификация;
- выщелачивание из почвенного профиля в грунтовые воды.

Скорость вышеперечисленных процессов может существенно отличаться в почвах, различающихся по свойствам и гидротермическим характеристикам. В нашем обзоре сделан акцент на процессах трансформации азотсодержащих соединений и количественном выражении этих процессов для почв со свойствами, характерными для агрогенно-преобразованных черноземных почв – гранулометрический состав от легкосуглинистого до легкоглинистого, актуальная кислотность от слабокислой до нейтральной, которые составляют основу пахотного фонда черноземного пояса России.

Считаем перспективным в практическом и теоретическом аспектах проведение дальнейших экспериментальных исследований по изучению влияния влажности и, особенно, температуры почвы на скорость процессов трансформации азотсодержащих соединений в черноземных почвах в условиях как инкубационных, так и полевых опытов. Учитывая быстрое распространение применения жидких азотных удобрений (безводного аммиака и карбамидо-аммиачных смесей) в Сибири и в России в целом, представляет большой практический интерес исследование поведения азота этих удобрений

при различных сроках внесения, определяющих режимы температуры и влажности, при которых будет происходить трансформация этих форм азота в почве и, как следствие, накопление нитратного азота к периоду интенсивного поглощения азота растениями.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор искренне признателен Анастасии Анатольевне Крыловой, ведущему инженеру лаборатории агрохимии Института почвоведения и агрохимии СО РАН, за помощь в оформлении рукописи данной статьи.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

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

ЛИТЕРАТУРА

- Башкин В.Н. О роли необменного аммония в азотном режиме почв. Диссертация ... канд. биол. наук. Пушкино-на-Оке, 1974. 210 с.
- Башкин В.Н. Повышение эффективности использования азота: проблемы и пути решения. Сообщение 1. Агрогеохимические подходы // Агрохимия. 2022. № 7. С. 82–96. <https://doi.org/10.31857/S0002188122070031>
- Гамзиков Г.П. Азот в земледелии Западной Сибири. Москва: Наука, 1981. 267 с.
- Гамзиков Г.П. Агрохимия азота в агроценозах. Новосибирск: РАСХН, Сибирское отделение, 2013. 790 с.
- Гамзиков Г.П., Кострик Г.И., Емельянова В.Н. Баланс и превращение азота удобрений. Новосибирск. Наука, Сибирское отделение. 1985. 161 с.
- Завалин А.А., Соколов О.А., Шмырева Н.Я. Азот в агроecosистеме на черноземных почвах. Москва: РАН, 2018. 180 с.
- Карабут Т. В форме воды. Потребление жидких удобрений в России превысило 770 тысяч тонн // Агроинвестор. 2020. № 6. URL: <https://www.agroinvestor.ru/technologies/article/33818-v-forme-vody-potreblenie-zhidkikh-udobreniy-v-rossii-prevysilo-770-tysyach-tonn> (дата обращения: 22.09.2025).
- Кудяров В.Н. Цикл азота в почве и эффективность удобрений. Москва: Наука, 1989. 216 с.
- Национальный атлас почв Российской Федерации / гл. ред. С.А. Шоба. Москва: Астрель, АСТ Москва, 2011. 631 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://soil-db.ru/soilatlas> (дата обращения: 22.09.2025).
- Применение жидких азотных удобрений КАС и серосодержащих удобрений. Источник: Минсельхоз Самарской области // АгроВестник. Дата публикации: 12.01.2020. [Электронный ресурс]. URL: <https://agrovesti.net/lib/tech/fertilizer-tech/primenenie-zhidkikh-azotnykh-udobrenij-kas-i-serosoderzhashchikh-udobrenij.html> (дата обращения: 22.09.2025).
- Хамова О.Ф. Фиксированный аммоний в почвах Омского Прииртышья и его доступность растениям: Автореферат диссертации ... канд. биол. наук. Новосибирск, 1982. 18 с.
- Шейн Е.В. Гранулометрический состав почв: проблемы методов исследования, интерпретации результатов и классификаций // Почвоведение. 2009. № 3. С. 309–317.
- Щеглов Д.И. Черноземы центральных областей России: современное состояние и направление эволюции // Черноземы Центральной России: генезис, эволюция и проблемы рационального использования. Сборник материалов научной конференции, посвященной 80-летию кафедры почвоведения и управления земельными ресурсами в 100-летней истории Воронежского государственного университета / под ред. Д.И. Щеглова. Воронеж: Издательско-полиграфический центр «Научная книга», 2017. С. 5–18.
- Якименко В.Н. Фиксация калия и аммония почвой агроценозов // Агрохимия. 2011. № 8. С. 5–10.
- Addiscott T.M. Kinetics and temperature relationships of mineralization and nitrification in Rothamsted soils with differing histories // Journal of Soil Science. 1983. Vol. 34. No. 2. P. 343–353. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1983.tb01040.x>
- Allison F.E. Nonbiological Immobilization of Nitrogen. Chapter 11. In book: Soil Organic Matter and Its Role in Crop Production. Developments in Soil Science. Vol. 3. Elsevier Scientific Publishing Company. Amsterdam, London, New York. 1973. P. 206–229. [https://doi.org/10.1016/s0166-2481\(08\)70569-5](https://doi.org/10.1016/s0166-2481(08)70569-5)
- Anderson O.E. The effect of low temperatures on nitrification of ammonia in Cecil sandy loam // Soil Science Society of America Journal. 1960. Vol. 24. No. 4. P. 286–289. <https://doi.org/10.2136/sssaj1960.03615995002400040022x>

- Angus J.F., Gupta V.V.S.R., Pitson G.D., Good A.J. Effects of banded ammonia and urea fertiliser on soil properties and the growth and yield of wheat // *Crop and Pasture Science*. 2014. Vol. 65. No. 4. P. 337–352. <https://doi.org/10.1071/CP13337>
- Barker B. Anhydrous ammonia retention in soil is high // *Top Crop Manager*. 1999. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.topcropmanager.com/anhydrous-ammonia-retention-in-soil-is-high-10571/> (дата обращения: 22.09.2025).
- Barth G., Otto R., Almeida R.F., Cardoso E.J.B.N., Cantarella H., Vitti G.C. Conversion of ammonium to nitrate and abundance of ammonium-oxidizing-microorganism in Tropical soils with nitrification inhibitor // *Scientia Agricola*. 2019. Vol. 77. No. 4. P. e20180370. <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2018-0370>
- Benke M.B., Goh T.B., Karamanos R., Lupwayi N.Z., Hao X. Retention and nitrification of injected anhydrous NH₃ as affected by soil pH // *Canadian Journal of Soil Science*. 2012. Vol. 92. No. 4. P. 589–598. <https://doi.org/10.4141/CJSS2011-108>
- Booth M., Stark J., Rastetter E. Controls on nitrogen cycling in terrestrial ecosystems: a synthetic analysis of literature data // *Ecological monographs*. 2005. Vol. 75. No. 2. P. 139–157. <https://doi.org/10.1890/04-0988>
- Bouwmeester R.J.B., Vlek P.L.G., Stumpe J.M. Effect of environmental factors on ammonia volatilization from a urea-fertilized soil // *Soil Science Society of America Journal*. 1985. Vol. 49. No. 2. P. 376–381. <https://doi.org/10.2136/sssaj1985.03615995004900020021x>
- Braun J., Mooshammer M., Wanek W., Prommer J., Walker T.W.N., Rütting T., Richter A. Full ¹⁵N tracer accounting to revisit major assumptions of ¹⁵N isotope pool dilution approaches for gross nitrogen mineralization // *Soil Biology and Biochemistry*. 2018. Vol. 117. P. 16–26. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.11.005>
- Broadbent F.E., Stevenson F.J. Organic matter interactions. In book: *Agricultural anhydrous ammonia technology and use*. M.H. McVikar, W.P. Martin, I.E. Miles and H.H. Tucker (eds.). Agricultural Ammonia Institute, Memphis, Tennessee. 1966. P. 169–187.
- Burger M., Jackson L.E. Microbial immobilization of ammonium and nitrate in relation to ammonification and nitrification rates in organic and conventional cropping systems // *Soil Biology and Biochemistry*. 2003. Vol. 35. No. 1. P. 29–36. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(02\)00233-X](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(02)00233-X)
- Cavalli D., Consolati G., Marino P., Bechini L. Measurement and simulation of soluble, exchangeable, and non-exchangeable ammonium in three soils // *Geoderma*. 2015. Vol. 259–260. P. 116–125. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.05.011>
- Drury C.F., Beauchamp E.G. Ammonium fixation, release, nitrification and immobilization in high- and low-fixing soils // *Soil Science Society of America Journal*. 1991. Vol. 55. No. 1. P. 125–129. <https://doi.org/10.2136/sssaj1991.03615995005500010022x>
- Fuka M.M., Engel M., Hafen A., Munch J.C., Sommer M., Schlöter M. Changes of diversity pattern of proteolytic bacteria over time and space in an agricultural soil // *Microbial Ecology*. 2009. Vol. 57. No. 3. P. 391–401. <https://doi.org/10.1007/s00248-008-9416-5>
- Ghaly A.E., Ramakrishnan V.V. Nitrification of urea and assimilation of nitrate in saturated soils under aerobic conditions // *American Journal of Agricultural and Biological Sciences*. 2013. Vol. 8. No. 4. P. 330–342. <https://doi.org/10.3844/ajabssp.2013.330.342>
- IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015 International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome. 2015. 192 p.
- Izaurrealde R.C., Kissel D.E., Cabrera M.L. Titratable acidity to estimate ammonia retention // *Soil Science Society of America Journal*. 1987. Vol. 51. No. 4. P. 1050–1054. <https://doi.org/10.2136/sssaj1987.03615995005100040041x>
- Jensen E.S., Christensen B.T., Sørensen L.H. Mineral-fixed ammonium in clay- and silt-size fractions of soils incubated with ¹⁵N-ammonium sulphate for five years // *Biology and Fertility of Soils*. 1989. Vol. 8. No. 4. P. 298–302. <https://doi.org/10.1007/BF00263158>
- Jones D.L., Clode P.L., Kilburn M.R., Stockdale E.A., Murphy D.V. Competition between plant and bacterial cells at the microscale regulates the dynamics of nitrogen acquisition in wheat (*Triticum aestivum*) // *New Phytologist*. 2013. Vol. 200. No. 3. P. 796–807. <https://doi.org/10.1111/nph.12405>
- Justice J.K., Smith R.I. Nitrification of ammonium sulfate in a calcareous soil as influenced by combinations of moisture, temperature, and levels of added nitrogen // *Soil Science Society of America Journal*. 1962. Vol. 26. No. 3. P. 246–250. <https://doi.org/10.2136/sssaj1962.03615995002600030017x>
- Kissel D.E., Cabrera M.L., Paramasivam S. Chapter 4. Ammonium, ammonia, and urea reactions in soils // *Nitrogen in Agricultural Systems*. 2008. Vol. 49. P. 101–155. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr49.c4>

- Kowalenko C.G., Cameron D.R. Nitrogen transformation in an incubated soil as affected by combinations of moisture content and temperature and adsorption-fixation of ammonium // *Canadian Journal of Soil Science*. 1976. Vol. 56. No. 2. P. 63–70. <https://doi.org/10.4141/cjss76-010>
- Kowalenko C.G., Ross G.J. Studies on the dynamics of “recently” clay-fixed NH_4 using ^{15}N // *Canadian Journal of Soil Science*. 1980. Vol. 60. No. 1. P. 61–70. <https://doi.org/10.4141/cjss80-007>
- Kyveryga P.M., Blackmer A.M., Ellsworth J.W., Isla R. Soil pH effects on nitrification of fall applied anhydrous ammonia // *Soil Science Society of America Journal*. 2004. Vol. 68. No. 2. P. 545–551. <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.0545>
- Lindbeck M.R., Young J.L. Polarography of intermediates in the fixation of nitrogen by p-quinone-aqueous ammonia systems // *Analytica Chimica Acta*. 1965. Vol. 32. P. 73–80. [https://doi.org/10.1016/S0003-2670\(00\)88894-7](https://doi.org/10.1016/S0003-2670(00)88894-7)
- Macduff J.H., White R.E. Net mineralization and nitrification rates in a clay soil measured and predicted in permanent grassland from soil temperature and moisture content // *Plant and Soil*. 1985. Vol. 86. No. 2. P. 151–172. <https://doi.org/10.1007/BF02182891>
- Mendum T.A., Sockett R.E., Hirsch P.R. Use of molecular and isotopic techniques to monitor the response of autotrophic ammonia-oxidizing populations of the beta-subdivision of the class proteobacteria in arable soils to nitrogen fertilizer // *Applied and Environmental Microbiology* 1999. Vol. 65. No. 9. P. 4155–4162. <https://doi.org/10.1128/aem.65.9.4155-4162.1999>
- Moyo C.C., Kissel D.E., Cabrera M.L. Temperature effects on soil urease activity // *Soil Biology and Biochemistry* 1989. Vol. 21. No. 7. P. 935–938. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(89\)90083-7](https://doi.org/10.1016/0038-0717(89)90083-7)
- Murphy D.V., Recous S., Stockdale E.A., Fillery I.R.P., Jensen L.S., Hatch D.J., Goulding K.W.T. Gross nitrogen fluxes in soil: theory, measurement and application of ^{15}N pool dilution techniques // *Advances in Agronomy*. 2003. Vol. 79. No. 69. P. e118. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(02\)79002-0](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(02)79002-0)
- Myrold D.D., Pett-Ridge J., Bottomley P.J. Nitrogen mineralization and assimilation at millimeter scales // *Methods in Enzymology*. 2011. Vol. 496. P. 91–114. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-386489-5.00004-X>
- Nieder R., Benbi D.K., Scherer H.W. Fixation and defixation of ammonium in soils: a review // *Biology and Fertility of Soils*. 2011. Vol. 47. No. 1. P. 1–14. <https://doi.org/10.1007/s00374-010-0506-4>
- Nommik H., Vahtras K. Retention and Fixation of Ammonium and Ammonia in Soils. Chapter 4. In book: *Nitrogen in Agricultural Soils*. Agronomy Monograph 22. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America. Madison, WI, USA, 1982. P. 123–171. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr22.c4>
- Norman R.J., Kurtz L.T., Stevenson F.J. Distribution and recovery of nitrogen-15-labeled anhydrous ammonia among various soil fractions // *Soil Science Society of America Journal*. 1987. Vol. 51. No. 1. P. 235–241. <https://doi.org/10.2136/sssaj1987.03615995005100010048x>
- Norton J.M. Nitrification in agricultural soils. In book: *Nitrogen in agricultural systems*. J.S. Schepers, W.R. Raun (eds.). ASA-CSSA-SSSA, Madison, WI, USA, 2008. Vol. 49. P. 173–199. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr49.c6>
- Norton J., Ouyang Y. Controls and adaptive management of nitrification in agricultural soils // *Frontiers in Microbiology*. 2019. Vol. 10. Article 1931. P. 1–18. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.01931>
- Opuwaribo E., Odu C.T.I. Ammonium fixation in Nigerian soils: 5. Types of clay minerals and relationship with ammonium fixation // *Soil Science*. 1978. Vol. 125. No. 5. P. 283–293.
- Pettit N.M., Smith A.R., Freedman R.B., Burns R.G. Soil urease: Activity, stability, and kinetic parameters // *Soil Biology and Biochemistry*. 1976. Vol. 8. No. 6. P. 479–487. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(76\)90089-4](https://doi.org/10.1016/0038-0717(76)90089-4)
- Russell C.A., Fillery I.R.P., Bootsma N., McInnes K.J. Effect of temperature and nitrogen source on nitrification in a sandy soil // *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 2002. Vol. 33. No. 11–12. P. 1975–1989. <https://doi.org/10.1081/CSS-120004836>
- Sahrawat K.L. Nitrification in some tropical soils // *Plant and Soil*. 1982. Vol. 65. No. 2. P. 281–286. <https://doi.org/10.1007/BF02374659>
- Sahrawat K.L. Factors affecting nitrification in soils // *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 2008. Vol. 39. No. 9–10. P. 1436–1446. <https://doi.org/10.1080/00103620802004235>
- Sawyer J. Understanding anhydrous ammonia application in soil. Iowa State University, Extension and Outreach: Integrated Crop Management. March 2019. [Электронный ресурс]. URL: <https://crops.extension.iastate.edu/cropnews/2019/03/understanding-anhydrous-ammonia-application-soil> (дата обращения 22.09.2025).
- Schepers J.S., Fox R.H. Estimation of N budgets for crops. Chapter 8 // *Developments in Agricultural and Managed Forest Ecology*. Elsevier, 1989. Vol. 21. P. 221–246. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-87393-4.50014-9>

- Schmidt E.L. Nitrification in Soil. Chapter 7 // Nitrogen in Agricultural Soils. Agronomy Monograph 22. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America. Madison, WI, USA. 1982. P. 253–288. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr22.c7>
- Sigurdarson J.J., Svane S., Karring H. The molecular processes of urea hydrolysis in relation to ammonia emissions from agriculture // Reviews Environmental Science Bio/Technology. 2018. Vol. 17. No. 2. P. 241–258. <https://doi.org/10.1007/s11157-018-9466-1>
- Sippola J., Ervio R., Eleveld R. The effects of nitrogen added as ammonium and manure to soils with a high ammonium-fixing capacity // Annales Agriculturae Fenniae. 1973. Vol. 12. P. 185–189.
- Smith R.V., Doyle R.M., Burns L.C., Stevens R.J. A model for nitrite accumulation in soils // Soil Biology and Biochemistry. 1997. Vol. 29. No. 8. P. 1241–1247. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(97\)00028-X](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(97)00028-X)
- Sommer S.G., Christensen B.T. Ammonia volatilization after injection of anhydrous ammonia into arable soils of different moisture levels // Plant and Soil. 1992. Vol. 142. No. 1. P. 143–146. <https://doi.org/10.1007/BF00010184>
- Sommer S.G., Schjoerring J.K., Denmead O.T. Ammonia emission from mineral fertilizers and fertilized crops // Advances in Agronomy. 2004. Vol. 82. P. 557–622. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(03\)82008-4](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(03)82008-4)
- Sowden F.J. Transformation of nitrogen added as ammonium and manure to soil with a high ammonium-fixing capacity under laboratory conditions // Canadian Journal of Soil Science. 1976. Vol. 56. No. 4. P. 319–331. <https://doi.org/10.4141/cjss76-041>
- Stevenson F.J., Cole M.A. Cycles of Soils: Carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, micronutrients. Second edition. New York: John Wiley and Sons, 1999. 427 p.
- Strong D.T., Sale P.W.G., Helyar K.R. The influence of soil matrix on nitrogen mineralization and nitrification. IV. Texture // Soil Research. 1999. Vol. 37. No. 2. P. 329–344. <https://doi.org/10.1071/S98043>
- Thorn K.A., Mikita M.A. Ammonia fixation by humic substances: a nitrogen- 15 and carbon- 13 NMR study // Science of the Total Environment. 1992. Vol. 113. No. 1–2. P. 67–87. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(92\)90017-M](https://doi.org/10.1016/0048-9697(92)90017-M)
- Trehan S.P. Immobilisation of $^{15}\text{NH}_4^+$ in three soils by chemical and biological processes // Soil Biology and Biochemistry. 1996. Vol. 28. No. 8. P. 1021–1027. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(96\)00085-5](https://doi.org/10.1016/0038-0717(96)00085-5)
- Wilkinson A., Hill P.W., Farrar J.F., Jones D.L., Bardgett R.D. Rapid microbial uptake and mineralization of amino acids and peptides along a grassland productivity gradient // Soil Biology and Biochemistry. 2014. Vol. 72. P. 75–83. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.01.026>
- Wozniak E.M., Baughman S.G. Patent Number: 5.549.728. Date of Patent: 27 Aug., 1996. [Электронный ресурс]. URL: <https://patents.google.com/patent/US5549728A/en> (дата обращения 22.09.2025).

Поступила в редакцию 23.09.2025

Принята 22.10.2025

Опубликована 27.10.2025

Сведения об авторе:

Барсуков Павел Анатольевич – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории агрохимии ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск, Россия); barsukov.issa-siberia@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6554-9721>

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.



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

Transformation of ammonia, ammonium and amide fertilizers in chernozemic soils

© 2025 P. A. Barsukov 

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

The review examines the processes occurring with ammonia, ammonium and amide fertilizers in the first 7–10 days after their application to soil, as well as the factors (both external abiotic and inner soil-specific) that determine the transformation rate of these nitrogen compounds. A more detailed analysis is provided of the influence of factors/conditions, common for agro-transformed chernozemic soils, on a corresponding (relatively high) soil organic matter content, granulometric composition (ranging from sandy loam to sandy clay), and actual

acidity (ranging from slightly acidic to neutral), i.e. soils that are the basis of the arable land of the chernozemic belt of Russia. The conclusion presents a diagram of the main processes of nitrogen fertilizer transformation and the intensity of these processes when fertilizers are applied right before or at the time of sowing in chernozemic soils in late spring (which for the agricultural region of Siberia usually falls on the first-second and, less often, third decade of May), which allows the results of this review to be used for practical purposes.

Keywords: *nitrogen; fertilizers; ammonia; ammonium; amide; nitrate; transformation of fertilizers in soil; chernozemic soils; Siberia.*

How to cite: Barsukov P.A. Transformation of ammonia, ammonium and amide fertilizers in chernozemic soils. The Journal of Soils and Environment. 2025. 8(3). e337. DOI: [10.31251/pos.v8i3.337](https://doi.org/10.31251/pos.v8i3.337) (in Russian with English abstract).

ACKNOWLEDGEMENTS

The author is sincerely grateful to Anastasia Anatolyevna Krylova, engineer with the laboratory of agrochemistry in the Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, for her assistance in preparing the manuscript for this article.

FUNDING

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

REFERENCES

- Bashkin V.N. On the role of non-exchangeable ammonium in the nitrogen regime of soils. Dissertation ... Cand. of Biol. Sci. Pushchino-na-Oke, 1974. 210 p. (in Russian).
- Bashkin V.N. Improving the efficiency of nitrogen use: problems and solutions. Part 1. Agrogeochemical approaches. Agrokhimia. 2022. No. 7. P. 82–96. (in Russian). <https://doi.org/10.31857/S0002188122070031>
- Gamzikov G.P. Nitrogen in Agriculture of Western Siberia. Moscow: Nauka Publ., 1981. 267 p. (in Russian).
- Gamzikov G.P. Agricultural chemistry of nitrogen in agroecosystems. Novosibirsk: Russian Academy of Agricultural Sciences, Siberian Branch, 2013. 790 p. (in Russian).
- Gamzikov G.P., Kostrik G.I., Emelyanova V.N. Balance and transformation of fertilizer nitrogen. Novosibirsk: Nauka Publ., Siberian Branch, 1985. 161 p. (in Russian).
- Zavalin A.A., Sokolov O.A., Shmyreva N.Ya. Nitrogen in the agrosystem on chernozem soils. Moscow: RAS, 2018. 180 p. (in Russian).
- Karabut T. In the form of water. Liquid fertilizer consumption in Russia exceeded 770,000 tons. Agroinvestor. 2020. No. 6. URL: <https://www.agroinvestor.ru/technologies/article/33818-v-forme-vody-potreblenie-zhidkikh-udobreniy-v-rossii-prevysilo-770-tysyach-tonn> (accessed on 22.09.2025). (in Russian).
- Kudeyarov V.N. Nitrogen cycle in soil and fertilizer efficiency. Moscow: Nauka Publ., 1989. 216 p. (in Russian).
- National Atlas of Soils of the Russian Federation / ed. S.A. Shoba. Moscow: Astrel, AST Moscow, 2011. 631 p. [Electronic resource]. URL: <https://soil-db.ru/soilatlas> (accessed on 22.09.2025). (in Russian).
- Application of liquid nitrogen fertilizers UAN and sulfur-containing fertilizers. Ministry of Agriculture of the Samara Region. AgroVestnik. Publication date: 12.01.2020. [Electronic resource]. URL: <https://agrovesti.net/lib/tech/fertilizer-tech/primenenie-zhidkikh-azotnykh-udobrenij-kas-i-serosoderzhashchikh-udobrenij.html> (accessed on 22.09.2025). (in Russian).
- Khamova O.F. Fixed ammonium in the soils of the Omsk Irtysh region and its availability to plants: Abstract of Dissertation ... Cand. of Biol. Sci. Novosibirsk, 1982. 18 p. (in Russian).
- Shein E.V. The particle-size distribution in soils: Problems of the methods of study, interpretation of the results, and classification. Eurasian Soil Science. 2009. Vol. 42. No. 3. P. 284–291. <https://doi.org/10.1134/S1064229309030053>
- Shcheglov D.I. Chernozems of the central regions of Russia: current state and direction of evolution. In book: Chernozems of Central Russia: genesis, evolution and problems of rational use. Collection of materials of the scientific conference dedicated to the 80th anniversary of the Department of Soil Science and Land Resources Management in the 100-year history of Voronezh State University / edited by D.I. Shcheglov. Voronezh: Publishing and Printing Center “Nauchnaya kniga”, 2017. P. 5–18. (in Russian).
- Yakimenko V.N. Fixation of potassium and ammonium by soil of agrocenoses. Agrokhimia. 2011. No. 8. P. 5–10. (in Russian).

- Addiscott T.M. Kinetics and temperature relationships of mineralization and nitrification in Rothamsted soils with differing histories. *Journal of Soil Science*. 1983. Vol. 34. No. 2. P. 343–353. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1983.tb01040.x>
- Allison F.E. Nonbiological Immobilization of Nitrogen. Chapter 11. In book: *Soil Organic Matter and Its Role in Crop Production*. Developments in Soil Science. Vol. 3. Elsevier Scientific Publishing Company. Amsterdam, London, New York. 1973. P. 206–229. [https://doi.org/10.1016/s0166-2481\(08\)70569-5](https://doi.org/10.1016/s0166-2481(08)70569-5)
- Anderson O.E. The effect of low temperatures on nitrification of ammonia in Cecil sandy loam. *Soil Science Society of America Journal*. 1960. Vol. 24. No. 4. P. 286–289. <https://doi.org/10.2136/sssaj1960.03615995002400040022x>
- Angus J.F., Gupta V.V.S.R., Pitson G.D., Good A.J. Effects of banded ammonia and urea fertiliser on soil properties and the growth and yield of wheat. *Crop and Pasture Science*. 2014. Vol. 65. No. 4. P. 337–352. <https://doi.org/10.1071/CP13337>
- Barker B. Anhydrous ammonia retention in soil is high. *Top Crop Manager*. 1999. [Electronic resource]. URL: <https://www.topcropmanager.com/anhydrous-ammonia-retention-in-soil-is-high-10571/> (accessed on: 22.09.2025).
- Barth G., Otto R., Almeida R.F., Cardoso E.J.B.N., Cantarella H., Vitti G.C. Conversion of ammonium to nitrate and abundance of ammonium-oxidizing-microorganism in Tropical soils with nitrification inhibitor. *Scientia Agricola*. 2019. Vol. 77. No. 4. P. e20180370. <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2018-0370>
- Benke M.B., Goh T.B., Karamanos R., Lupwayi N.Z., Hao X. Retention and nitrification of injected anhydrous NH₃ as affected by soil pH. *Canadian Journal of Soil Science*. 2012. Vol. 92. No. 4. P. 589–598. <https://doi.org/10.4141/CJSS2011-108>
- Booth M., Stark J., Rastetter E. Controls on nitrogen cycling in terrestrial ecosystems: a synthetic analysis of literature data. *Ecological monographs*. 2005. Vol. 75. No. 2. P. 139–157. <https://doi.org/10.1890/04-0988>
- Bouwmeester R.J.B., Vlek P.L.G., Stumpe J.M. Effect of environmental factors on ammonia volatilization from a urea-fertilized soil. *Soil Science Society of America Journal*. 1985. Vol. 49. No. 2. P. 376–381. <https://doi.org/10.2136/sssaj1985.03615995004900020021x>
- Braun J., Mooshammer M., Wanek W., Prommer J., Walker T.W.N., Rütting T., Richter A. Full ¹⁵N tracer accounting to revisit major assumptions of ¹⁵N isotope pool dilution approaches for gross nitrogen mineralization. *Soil Biology and Biochemistry*. 2018. Vol. 117. P. 16–26. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.11.005>
- Broadbent F.E., Stevenson F.J. Organic matter interactions. In book: *Agricultural anhydrous ammonia technology and use*. M.H. McVickar, W.P. Martin, I.E. Miles and H.H. Tucker (eds.). Agricultural Ammonia Institute, Memphis, Tennessee. 1966. P. 169–187.
- Burger M., Jackson L.E. Microbial immobilization of ammonium and nitrate in relation to ammonification and nitrification rates in organic and conventional cropping systems. *Soil Biology and Biochemistry*. 2003. Vol. 35. No. 1. P. 29–36. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(02\)00233-X](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(02)00233-X)
- Cavalli D., Consolati G., Marino P., Bechini L. Measurement and simulation of soluble, exchangeable, and non-exchangeable ammonium in three soils. *Geoderma*. 2015. Vol. 259–260. P. 116–125. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.05.011>
- Drury C.F., Beauchamp E.G. Ammonium fixation, release, nitrification and immobilization in high- and low-fixing soils. *Soil Science Society of America Journal*. 1991. Vol. 55. No. 1. P. 125–129. <https://doi.org/10.2136/sssaj1991.03615995005500010022x>
- Fuka M.M., Engel M., Hafen A., Munch J.C., Sommer M., Schlöter M. Changes of diversity pattern of proteolytic bacteria over time and space in an agricultural soil. *Microbial Ecology*. 2009. Vol. 57. No. 3. P. 391–401. <https://doi.org/10.1007/s00248-008-9416-5>
- Ghaly A.E., Ramakrishnan V.V. Nitrification of urea and assimilation of nitrate in saturated soils under aerobic conditions. *American Journal of Agricultural and Biological Sciences*. 2013. Vol. 8. No. 4. P. 330–342. <https://doi.org/10.3844/ajabssp.2013.330.342>
- IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015 International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome. 2015. 192 p.
- Izaurrealde R.C., Kissel D.E., Cabrera M.L. Titratable acidity to estimate ammonia retention. *Soil Science Society of America Journal*. 1987. Vol. 51. No. 4. P. 1050–1054. <https://doi.org/10.2136/sssaj1987.03615995005100040041x>
- Jensen E.S., Christensen B.T., Sørensen L.H. Mineral-fixed ammonium in clay- and silt-size fractions of soils incubated with ¹⁵N-ammonium sulphate for five years. *Biology and Fertility of Soils*. 1989. Vol. 8. No. 4. P. 298–302. <https://doi.org/10.1007/BF00263158>

- Jones D.L., Clode P.L., Kilburn M.R., Stockdale E.A., Murphy D.V. Competition between plant and bacterial cells at the microscale regulates the dynamics of nitrogen acquisition in wheat (*Triticum aestivum*). *New Phytologist*. 2013. Vol. 200. No. 3. P. 796–807. <https://doi.org/10.1111/nph.12405>
- Justice J.K., Smith R.I. Nitrification of ammonium sulfate in a calcareous soil as influenced by combinations of moisture, temperature, and levels of added nitrogen. *Soil Science Society of America Journal*. 1962. Vol. 26. No. 3. P. 246–250. <https://doi.org/10.2136/sssaj1962.03615995002600030017x>
- Kissel D.E., Cabrera M.L., Paramasivam S. Chapter 4. Ammonium, ammonia, and urea reactions in soils. *Nitrogen in Agricultural Systems*. 2008. Vol. 49. P. 101–155. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr49.c4>
- Kowalenko C.G., Cameron D.R. Nitrogen transformation in an incubated soil as affected by combinations of moisture content and temperature and adsorption-fixation of ammonium. *Canadian Journal of Soil Science*. 1976. Vol. 56. No. 2. P. 63–70. <https://doi.org/10.4141/cjss76-010>
- Kowalenko C.G., Ross G.J. Studies on the dynamics of “recently” clay-fixed NH_4 using ^{15}N . *Canadian Journal of Soil Science*. 1980. Vol. 60. No. 1. P. 61–70. <https://doi.org/10.4141/cjss80-007>
- Kyveryga P.M., Blackmer A.M., Ellsworth J.W., Isla R. Soil pH effects on nitrification of fall applied anhydrous ammonia. *Soil Science Society of America Journal*. 2004. Vol. 68. No. 2. P. 545–551. <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.0545>
- Lindbeck M.R., Young J.L. Polarography of intermediates in the fixation of nitrogen by p-quinone-aqueous ammonia systems. *Analytica Chimica Acta*. 1965. Vol. 32. P. 73–80. [https://doi.org/10.1016/S0003-2670\(00\)88894-7](https://doi.org/10.1016/S0003-2670(00)88894-7)
- Macduff J.H., White R.E. Net mineralization and nitrification rates in a clay soil measured and predicted in permanent grassland from soil temperature and moisture content. *Plant and Soil*. 1985. Vol. 86. No. 2. P. 151–172. <https://doi.org/10.1007/BF02182891>
- Mendum T.A., Sockett R.E., Hirsch P.R. Use of molecular and isotopic techniques to monitor the response of autotrophic ammonia-oxidizing populations of the beta-subdivision of the class proteobacteria in arable soils to nitrogen fertilizer. *Applied and Environmental Microbiology* 1999. Vol. 65. No. 9. P. 4155–4162. <https://doi.org/10.1128/aem.65.9.4155-4162.1999>
- Moyo C.C., Kissel D.E., Cabrera M.L. Temperature effects on soil urease activity. *Soil Biology and Biochemistry* 1989. Vol. 21. No. 7. P. 935–938. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(89\)90083-7](https://doi.org/10.1016/0038-0717(89)90083-7)
- Murphy D.V., Recous S., Stockdale E.A., Fillery I.R.P., Jensen L.S., Hatch D.J., Goulding K.W.T. Gross nitrogen fluxes in soil: theory, measurement and application of ^{15}N pool dilution techniques. *Advances in Agronomy*. 2003. Vol. 79. No. 69. P. e118. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(02\)79002-0](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(02)79002-0)
- Myrold D.D., Pett-Ridge J., Bottomley P.J. Nitrogen mineralization and assimilation at millimeter scales. *Methods in Enzymology*. 2011. Vol. 496. P. 91–114. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-386489-5.00004-X>
- Nieder R., Benbi D.K., Scherer H.W. Fixation and defixation of ammonium in soils: a review. *Biology and Fertility of Soils*. 2011. Vol. 47. No. 1. P. 1–14. <https://doi.org/10.1007/s00374-010-0506-4>
- Nommik H., Vahtras K. Retention and Fixation of Ammonium and Ammonia in Soils. Chapter 4. In book: *Nitrogen in Agricultural Soils*. Agronomy Monograph 22. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America. Madison, WI, USA, 1982. P. 123–171. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr22.c4>
- Norman R.J., Kurtz L.T., Stevenson F.J. Distribution and recovery of nitrogen-15-labeled anhydrous ammonia among various soil fractions. *Soil Science Society of America Journal*. 1987. Vol. 51. No. 1. P. 235–241. <https://doi.org/10.2136/sssaj1987.03615995005100010048x>
- Norton J.M. Nitrification in agricultural soils. In book: *Nitrogen in agricultural systems*. J.S. Schepers, W.R. Raun (eds.). ASA-CSSA-SSSA, Madison, WI, USA, 2008. Vol. 49. P. 173–199. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr49.c6>
- Norton J., Ouyang Y. Controls and Adaptive Management of Nitrification in Agricultural Soils. *Frontiers in Microbiology*. 2019. Vol. 10. Article 1931. P. 1–18. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.01931>
- Opuwaribo E., Odu C.T.I. Ammonium fixation in Nigerian soils: 5. Types of clay minerals and relationship with ammonium fixation. *Soil Science*. 1978. Vol. 125. No. 5. P. 283–293.
- Pettit N.M., Smith A.R., Freedman R.B., Burns R.G. Soil urease: Activity, stability, and kinetic parameters. *Soil Biology and Biochemistry*. 1976. Vol. 8. No. 6. P. 479–487. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(76\)90089-4](https://doi.org/10.1016/0038-0717(76)90089-4)
- Russell C.A., Fillery I.R.P., Bootsma N., McInnes K.J. Effect of temperature and nitrogen source on nitrification in a sandy soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 2002. Vol. 33. No. 11–12. P. 1975–1989. <https://doi.org/10.1081/CSS-120004836>

- Sahrawat K.L. Nitrification in some tropical soils. *Plant and Soil*. 1982. Vol. 65. No. 2. P. 281–286. <https://doi.org/10.1007/BF02374659>
- Sahrawat K.L. Factors affecting nitrification in soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 2008. Vol. 39. No. 9–10. P. 1436–1446. <https://doi.org/10.1080/00103620802004235>
- Sawyer J. Understanding anhydrous ammonia application in soil. Iowa State University, Extension and Outreach: Integrated Crop Management, March 2019. [Electronic resource]. URL: <https://crops.extension.iastate.edu/cropnews/2019/03/understanding-anhydrous-ammonia-application-soil> (accessed on 22.09.2025).
- Schepers J.S., Fox R.H. Estimation of N budgets for crops. Chapter 8. *Developments in Agricultural and Managed Forest Ecology*. Elsevier, 1989. Vol. 21. P. 221–246. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-87393-4.50014-9>
- Schmidt E.L. Nitrification in Soil. Chapter 7. *Nitrogen in Agricultural Soils*. Agronomy Monograph 22. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America. Madison, WI, USA. 1982. P. 253–288. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr22.c7>
- Sigurdarson J.J., Svane S., Karring H. The molecular processes of urea hydrolysis in relation to ammonia emissions from agriculture. *Reviews Environmental Science Bio/Technology*. 2018. Vol. 17. No. 2. P. 241–258. <https://doi.org/10.1007/s11157-018-9466-1>
- Sippola J., Ervio R., Eleveld R. The effects of nitrogen added as ammonium and manure to soils with a high ammonium-fixing capacity. *Annales Agriculturae Fenniae*. 1973. Vol. 12. P. 185–189.
- Smith R.V., Doyle R.M., Burns L.C., Stevens R.J. A model for nitrite accumulation in soils. *Soil Biology and Biochemistry*. 1997. Vol. 29. No. 8. P. 1241–1247. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(97\)00028-X](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(97)00028-X)
- Sommer S.G., Christensen B.T. Ammonia volatilization after injection of anhydrous ammonia into arable soils of different moisture levels. *Plant and Soil*. 1992. Vol. 142. No. 1. P. 143–146. <https://doi.org/10.1007/BF00010184>
- Sommer S.G., Schjoerring J.K., Denmead O.T. Ammonia emission from mineral fertilizers and fertilized crops. *Advances in Agronomy*. 2004. Vol. 82. P. 557–622. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(03\)82008-4](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(03)82008-4)
- Sowden F.J. Transformation of nitrogen added as ammonium and manure to soil with a high ammonium-fixing capacity under laboratory conditions. *Canadian Journal of Soil Science*. 1976. Vol. 56. No. 4. P. 319–331. <https://doi.org/10.4141/cjss76-041>
- Stevenson F.J., Cole M.A. *Cycles of Soils: Carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, micronutrients*. Second edition. New York: John Wiley and Sons, 1999. 427 p.
- Strong D.T., Sale P.W.G., Helyar K.R. The influence of soil matrix on nitrogen mineralization and nitrification. IV. Texture. *Soil Research*. 1999. Vol. 37. No. 2. P. 329–344. <https://doi.org/10.1071/S98043>
- Thorn K.A., Mikita M.A. Ammonia fixation by humic substances: a nitrogen- 15 and carbon- 13 NMR study. *Science of the Total Environment*. 1992. Vol. 113. No. 1–2. P. 67–87. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(92\)90017-M](https://doi.org/10.1016/0048-9697(92)90017-M)
- Trehan S.P. Immobilisation of $^{15}\text{NH}_4^+$ in three soils by chemical and biological processes. *Soil Biology and Biochemistry*. 1996. Vol. 28. No. 8. P. 1021–1027. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(96\)00085-5](https://doi.org/10.1016/0038-0717(96)00085-5)
- Wilkinson A., Hill P.W., Farrar J.F., Jones D.L., Bardgett R.D. Rapid microbial uptake and mineralization of amino acids and peptides along a grassland productivity gradient. *Soil Biology and Biochemistry*. 2014. Vol. 72. P. 75–83. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.01.026>
- Wozniak E.M., Baughman S.G. Patent Number: 5.549.728. Date of Patent: 27 Aug., 1996. [Electronic resource]. URL: <https://patents.google.com/patent/US5549728A/en> (accessed on 22.09.2025).

Received 23 September 2025

Accepted 22 October 2025

Published 27 October 2025

About the author:

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@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6554-9721>

The author read and approved the final manuscriptThe article is available under [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)



Специфика насыщения снеготалыми водами почв агроценозов юго-востока Западной Сибири

© 2025 А. С. Чумбаев , Г. Ф. Миллер , С. В. Соловьев , А. Н. Безбородова , М. Б. Гожоев

ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, проспект Академика Лаврентьева, 8/2, г. Новосибирск, 630090, Россия. E-mail: chas30@mail.ru

Цель исследования. На фоне тенденции увеличения количества зимних осадков оценить специфичность насыщения почв склоновых территорий агроценозов юго-востока Западной Сибири снеготалыми водами в предпосевной период.

Место и время проведения. Присалаирская дренированная равнина, Буготаксткий мелкосопочник в пределах Новосибирской области, 2019–2024 гг.

Методы. Влажность почвы определяли термостатно-весовым методом в образцах, отобранных буром до глубины 150 см послойно, через каждый 10 см. Проводилось двукратное бурение. Измерение температуры почвы в полевых условиях и обустройство температурных площадок проводили в соответствии с ГОСТ 25358-2012 и РД 52.33.760-2011. На температурной площадке устанавливались автономные регистраторы температуры на глубинах 0, 5, 10, 15, 20 см и далее через каждые 20 см до глубины 160 см. Датчики программировались на 3-часовой интервал измерения температуры. Высоту снежного покрова определяли путем сплошных снегомерных съемок по параллельным маршрутам, пересекающим водосбор через каждые 100 м (РД 52.08.730-2010). Плотность и запасы воды в снеге на различных элементах катены определяли в двукратной повторности с помощью снегомера ВС-43.

Основные результаты. На основе анализа погодных данных в холодные периоды 2019–2024 гг. был установлен продолжающийся стабильный рост количества атмосферных осадков, зафиксированный авторами ранее. За исследуемые зимы в регионе в среднем выпало 180 мм осадков, что в 1,6 раз больше среднегодовой нормы. В изучаемые годы было отмечено, что запасы влаги в слое 0–50 см слабоэродированных черноземов находились ниже уровня наименьшей влагоемкости, из чего можно предположить, что почвы уходили в зиму с резервом водоемкости. Таяние снега в регионе начинается в первой половине апреля и, в зависимости от снежности зим и погодных условий, может длиться от 5 до 15 дней, за которые почва успевает оттаять с поверхности не более чем на 30 см. К моменту наибольшего поверхностного стока талых вод этот слой пропитывался талой водой до содержания влаги, превышающее полную влагоемкость (тиксотропное состояние). После прекращения поверхностного стока происходил сброс талой воды из почв как вглубь почвенного профиля (при условии полного оттаивания почв), так и внутрипочвенным стоком вниз по склону. Под воздействием прямых солнечных лучей и нарастающей круглосуточной положительной температуры воздуха шел дополнительный расход почвенной влаги на испарение. В результате этого, через несколько дней после окончания снеготаяния и поверхностного стока талых вод, запас влаги в слое 0–30 см пахотных почв соответствовал осеннему, а в отдельные годы отмечен дефицит (ниже уровня наименьшей влагоемкости).

Заключение. Пахотные черноземы юго-востока Западной Сибири могут иметь дефицит почвенной влаги в предпосевной период, несмотря на большой запас осенней водоемкости, высокое количество осадков в холодный период и значительный поверхностный сток талых вод. Содержание влаги в слоях почвы 0–30 и 0–50 см после снеготаяния на уровне (или ниже) наименьшей влагоемкости свидетельствует об особенностях поглощения снеготалых вод черноземами агроценозов юго-востока Западной Сибири. Недостаток почвенной влаги в предпосевной период отмечен в среднем 2 раза в пятилетие. Наличие внутрипочвенного мерзлотного экрана во время снеготаяния является основной преградой для талых вод, которые могли бы пополнить запас влаги в нижележащих слоях почвы. За период в 10–25 дней между окончанием снеготаяния и началом полевых работ, под действием нарастающих положительных температур воздуха и прямых солнечных лучей происходит дальнейший расход влаги на испарение из пахотного слоя 0–30 см. Атмосферные осадки мая очень важны для сельскохозяйственных культур в начале вегетационного периода, однако намечающаяся тенденция снижения доли осадков этого месяца в их годовом количестве может создавать сложности для формирования высоких и стабильных урожаев зерновых в регионе.

Ключевые слова: влажность почв; запас почвенной влаги; сток талых вод; снеготаяние; Западная Сибирь; почвы; холодный период.

Цитирование: Чумбаев А.С., Миллер Г.Ф., Соловьев С.В., Безбородова А.Н., Гожоев М.Б. Специфика насыщения снеготалыми водами почв агроценозов юго-востока Западной Сибири // Почвы и окружающая среда. 2025. Том 8. № 3. е339. DOI: [10.31251/pos.v8i3.339](https://doi.org/10.31251/pos.v8i3.339)

ВВЕДЕНИЕ

Почвенная влага играет большую роль в почвообразовании и является одним из главных факторов плодородия почв. Особенно важно количество влаги в начале вегетационного периода. Так, для озимых культур значимы запасы доступной влаги в период кушения, а для яровых – в период набухания и прорастания семян. Во многих регионах нашей страны запасы продуктивной влаги начинают формироваться уже в осенний и предзимний периоды. В силу особенностей природно-климатических условий Западной Сибири (отсутствие зимних оттепелей, сильное и глубокое промерзание почвенной толщи) основное пополнение запасов почвенной влаги в конце холодного периода происходит именно во время снеготаяния.

В классической работе А.А. Роде (1965) по гидрологии почв показано, что водный режим почв неразрывно связан с климатом. В тоже время, влажность почвы – важнейший климатический компонент, поскольку она в значительной степени определяет исходящие конвективные потоки тепла и влаги в атмосферу и, соответственно, температуру поверхности суши (Лавров, 2025).

С последней четверти XX в. в мире отмечается потепление климата с увеличением средней температуры приземного слоя воздуха и ростом годовой суммы осадков, хотя в условиях РФ отмечены районы с их уменьшением (Иванов, 2009). Наблюдаемый мировой тренд увеличения среднегодовой температуры отмечен и на юго-востоке Западной Сибири; одновременно с повышением температуры регистрируется и увеличение количества осадков.

Вопрос о многолетних колебаниях климатических параметров всегда был актуальным. А.И. Воейков (1952), проанализировав многолетние метеоданные г. Барнаул, отметил колебания количества осадков в 25-летних циклах. В 2019 году аналогичным образом был сделан анализ изменения температуры воздуха и количества осадков холодного сезона для территории Предсалаирья. Показано, что за 80 лет тренд количества осадков исследуемого региона направлен в сторону увеличения, как и тренд температуры воздуха за холодный период. Выявлено три полных цикла выпадения осадков холодного периода, длившихся по 25 лет, которые охарактеризованы как малоснежный, нормально снежный и многоснежный циклы. Был сделан прогноз, что четвертый цикл (начавшийся в 2013 г.) продолжится до 2037 г. и будет иметь признаки очень многоснежного, так как в среднем за 2013–2019 гг. запасы воды в снеге в 1,5 раза превышали количество осадков, выпадавших в нормально снежный цикл увлажнения на территории юго-востока Западной Сибири (112 мм) (Танасиенко и др., 2019). К аналогичным выводам об увеличении количества осадков пришли и другие исследователи (Виноградова и др., 2000; Дорохов, 2024).

Рассматривая вопрос влагообеспеченности агроценозов в предпосевной и посевной периоды, необходимо исследовать осадки именно холодного периода (ноябрь–апрель). Увеличение количества зимних осадков влияет на увеличение ранневесенних и предпосевных запасов влаги в почве агроценозов, однако это не всегда так. Значительная часть осадков зимне-весеннего периода расходуется на поверхностный сток и испарение еще до посева и не используется растениями в период их вегетации. Весенний посев яровых культур проводится при наступлении физической спелости почвы, а уже в период прохождения фазы колошения зерновые культуры часто испытывают недостаток доступной влаги; слабо развитая вторичная корневая система способствует значительному снижению потенциальной продуктивности (Халин, 2019).

Цель исследования – на фоне тенденции увеличения количества зимних осадков оценить специфичность насыщения почв склоновых территорий агроценозов юго-востока Западной Сибири снеготалыми водами в предпосевной период.

Основными задачами исследований являлись:

1. Изучить изменение количества осадков и температуры воздуха в холодные периоды 2019–2024 гг.
2. Провести анализ данных внутрисезонного изменения влажности почв агроценозов и запасов продуктивной влаги в предпосевной период.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Режим изменения почвенной температуры и влаги в холодный период (ноябрь–апрель) гидрологического года непрерывно изучается нами с 2001 года в агро- и биогеоценозах юго-востока Западной Сибири в пределах Новосибирского Предсалаирья. Климатические изменения изучались для трех административных районов Новосибирской области – Болотнинского, Тогучинского и Маслянинского, территория которых характеризуются наибольшим горизонтальным и вертикальным расчленением рельефа. В данной работе представлены материалы мониторинговых наблюдений климатических параметров за 2019–2024 гг. (<https://rp5.ru/>).

Объектами исследования служили гидротермические условия (температура воздуха и количество осадков) и гидротермический режим (температура и запасы влаги) черноземов выщелоченных слабоэродированных, сложившиеся в холодные периоды 2019–2024 гг. Поскольку на незэродированных черноземах Предсалаирья сток талых вод минимален, основное внимание при изучении элементов баланса влаги мы сосредоточили на слабоэродированных почвах, занимающих доминирующее положение (80%) среди эродированных черноземов. В качестве ключевого участка был выбран склон юго-восточной экспозиции, находящийся в пределах Присалаирской дренированной равнины (Предсалаирье), в самой расчлененной ее части – Буготакском мелкосопочнике (Новосибирская область, 55°01'43,7" с.ш. и 83°50'42,3" в.д.).

Температуру поверхности почвы, а также на глубинах 5, 10, 15, 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160 см фиксировали автономными регистраторами температуры DS-1921G Thermochron. Обустройство скважин и термометрических площадок проводили в соответствии с ГОСТ 25358-2012 и РД 52.33.760-2011. Температуру воздуха фиксировали аналогичным датчиком, закрепленным на деревянном шесте на высоте 2 м над поверхностью почвы и затененным от воздействия прямых солнечных лучей. Все датчики были запрограммированы на трехчасовой интервал измерений; таким образом, за сутки проводилось восемь измерений температуры. Начало и скорость, а также даты полного замерзания/оттаивания почв устанавливали по данным датчиков Thermochron. За глубину промерзания почв принимается толща почвы с температурой 0°C, при которой происходит замерзание свободной влаги.

Влажность почвы определяли термостатно-весовым методом (Вадюнина, Корчагина, 1973) в образцах, отобранных буром до глубины 150 см послойно, через каждый 10 см. Для оценки внутрисезонного изменения влажности почв на ключевых точках, образцы отбирали в предзимье (конец октября – начало ноября), перед снеготаянием (III декада марта) и после снеготаяния (15–30 апреля).

Натурные наблюдения за распределением снежного покрова и запасами воды в снеге проводили путем сплошных снегомерных съемок по параллельным маршрутам, пересекающим водосбор через каждые 100 м (РД 52.08.730-2010). Такие наблюдения осуществляли ежегодно в период с 20 по 30 марта, в декаду максимального запаса атмосферных осадков за холодный период. Высоту снега определяли снегомерной рейкой через каждые 5 м, а плотность – с помощью снегомера ВС-43 – через каждые 100 м в двукратной повторности.

Запас воды в снеге на водосборах определяли путем умножения средней арифметической величины плотности снежного покрова на среднюю высоту снега на том или ином элементе водосбора. Количество осадков (в твердом и/или жидком виде), выпадающие после этапа снегомерной съемки и до окончания снеготаяния, бралось из данных Росгидромета и суммировалось с полученными результатами снегомерной съемки.

Статистическая обработка результатов (среднеарифметическое $\pm$ стандартная ошибка среднего) исследований проводилась с использованием стандартных приемов в MS Excel.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЯ

Анализ данных за холодные периоды в интервале наблюдений с 2019 по 2024 гг. показал продолжающийся стабильный рост количества осадков, выпавших на территории Новосибирского Предсалаирья (рис. 1).

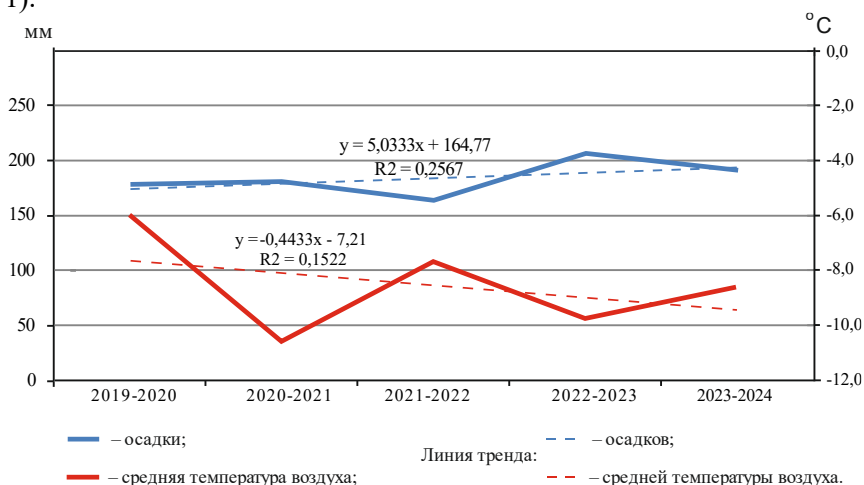


Рисунок 1. Средняя температура воздуха и сумма осадков холодных периодов.

За зимы этого периода в среднем выпало 180 мм осадков, что в 1,6 раз больше, чем в нормально снежный цикл. Одновременно с увеличением количества осадков отмечается снижение средней зимней температуры воздуха. Нисходящее положение линии тренда указывает на тенденцию похолодания зим на фоне увеличения количества осадков. Аналогичные результаты для юга Сибири получены и у других исследователей (Носкова и др., 2021).

Ранее установлено, что в предзимье, после теплого периода с разным увлажнением, запасы влаги верхнего полуметрового слоя черноземов Предсалаирья, вне зависимости от степени эродированности, могут превышать наименьшую влагоемкость (**НВ**), что предполагает наличие в этом слое гравитационной влаги (Танасиенко и др., 2017). Но дальнейший мониторинг влажности почв в холодный период гидрологического года показал, что с 2013 г. предзимние запасы влаги слоя 0–50 см слабозеродированных черноземов Предсалаирья находились ниже уровня наименьшей влагоемкости. Следовательно, в исследуемые годы (2019–2024 гг.) почвы уходили в зиму с резервом водовместимости от 1 до 60 мм (рис. 2).

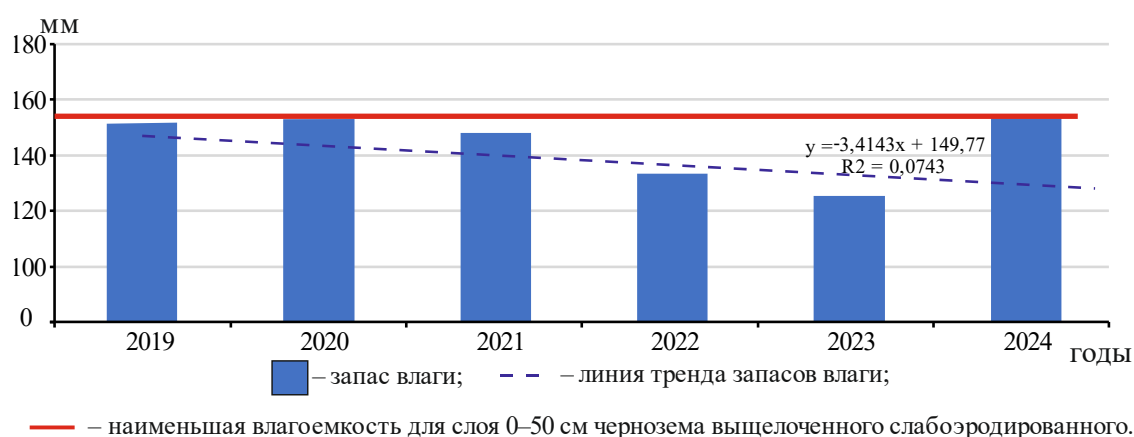


Рисунок 2. Предзимние запасы влаги в слое 0–50 см чернозема выщелоченного слабозеродированного.

Для выявления внутрисезонного изменения влажности исследуемых почв, в период проведения снегомерной съемки проводился отбор образцов почв для определения влажности на контрольных точках. Установлено, что запасы почвенной влаги в слое 0–50 см перед снеготаянием немного превышали осенние.

Анализ многолетних данных послойной влажности почв ключевого участка показал, что прибавка запаса влаги в верхнем полуметровом слое происходит исключительно за счет увеличения ее содержания в слое 0–30 см (табл. 1).

Таблица 1

Внутрисезонный послойный запас влаги в почвах ключевого участка, усредненный за период 2019–2024 гг.

Чернозем выщелоченный слабозеродированный, пашня	Слой, см	<i>n</i>	Предзимье	Перед снеготаянием	Разница
	0–30	12	93,2 ± 4,6*	126,8 ± 7,6	33,6
	0–50	12	146,3 ± 6,3	179,4 ± 7,9	33,1

Примечание.

* $M \pm m$ (среднеарифметическое ± стандартная ошибка среднего).

В большинстве случаев постоянный снежный покров в регионе устанавливается в ноябре, поверх теплой почвы, в результате чего происходит его подтаивание и насыщение снеготалыми водами верхней части почвенного профиля. Продолжающееся понижение температуры воздуха и расход запаса почвенного тепла на таяние снега на поверхности приводят к началу промерзания почвы и прекращению пополнения резервов влаги в верхних слоях почв. В мерзлом состоянии сибирские почвы находятся более 5 месяцев.

Первые положительные температуры воздуха на исследуемой территории отмечаются в третьей декаде марта. В дневное время, под действием прямых солнечных лучей и невысокой положительной температуры воздуха (0,5...1,5°C), на поверхности снежного покрова начинаются процессы как таяния,

так и сублимации. В ночное время, талая вода вновь замерзает, формируя на поверхности снежной толщи ледяную корку (наст).

Стабильное таяние снежного покрова, как правило, начинается в первой половине апреля и, в зависимости от снегозапасов и типа весенней погоды, может длиться от 5 до 15 дней. Наличие ледяной прослойки на поверхности и в толще снега затрудняет весной проникновение солнечных лучей и теплого воздуха вглубь снежной толщи, что приводит к снижению скорости снеготаяния и увеличению длительности этого периода. В отдельные годы присутствие довольно мощного (1–2 см) наста поверх снежного покрова в нижней трети склонов южной экспозиции ведет к миграции талых вод по поверхности снега в начальный период снеготаяния; поверхность почвы начинает оттаивать, еще находясь под снегом, под воздействием талой воды, просачивающейся сквозь толщу снега. Скорость оттаивания почвы под снегом весьма мала – около 2 мм/сутки; но с образованием первых проталин проявляется действие дополнительных факторов – прямых солнечных лучей и положительных температур воздуха, в результате чего интенсивность оттаивания почвы может достигать 10 см/сутки.

На юго-востоке Западной Сибири в первые дни активного таяния снега температура воздуха (а впоследствии, и температура поверхности почвы) еще недостаточно высока для полного прогрева почвенного профиля. Поэтому здесь ежегодно в первую половину снеготаяния (а в отдельные годы и на протяжении всего снеготаяния) в почве на глубине 30–60 см находится мерзлый слой с температурой 0°C и ниже – льдистый мерзлотный экран, где крупные поры заполнены льдом, препятствующий миграции талых вод в нижележащие почвенные слои (Чумбаев и др., 2013). Данный мерзлотный экран – специфическая особенность западносибирского почвенного климата холодного периода, отличающегося от такового в Европейской части России. Наличие льдистого мерзлотного экрана в почвах в весенний период является одной из главных причин формирования поверхностного стока талых вод и развития эрозионных процессов. Как правило, мерзлотный экран формируется на распаханых почвах, где в первые дни снеготаяния происходит быстрый прогрев лишь верхнего 10-сантиметрового слоя. Через несколько дней активного снеготаяния, при освободившейся от снега поверхности почвы, пахотный слой оттаивает до глубины 20–30 см и, пропитываясь талой водой, приобретает тиксотропное состояние (влажность более полной влагоемкости).

В конце снеготаяния (вторая-третья декада апреля) происходит сброс талой воды из почв как вглубь почвенного профиля (при условии полного оттаивания почв), так и с внутрисочевным стоком вниз по склону. Под воздействием прямых солнечных лучей и положительной среднесуточной температуры воздуха происходит дополнительный расход почвенной влаги на испарение.

В исследуемые годы указанные процессы способствовали тому, что весной 2020 года запас влаги в полуметровом слое после снеготаяния лишь немногим превышал наименьшую влагоемкость, а весной 2021 и 2022 годов он был меньше НВ, т.е. сформировался дефицит почвенной влаги (рис. 3).

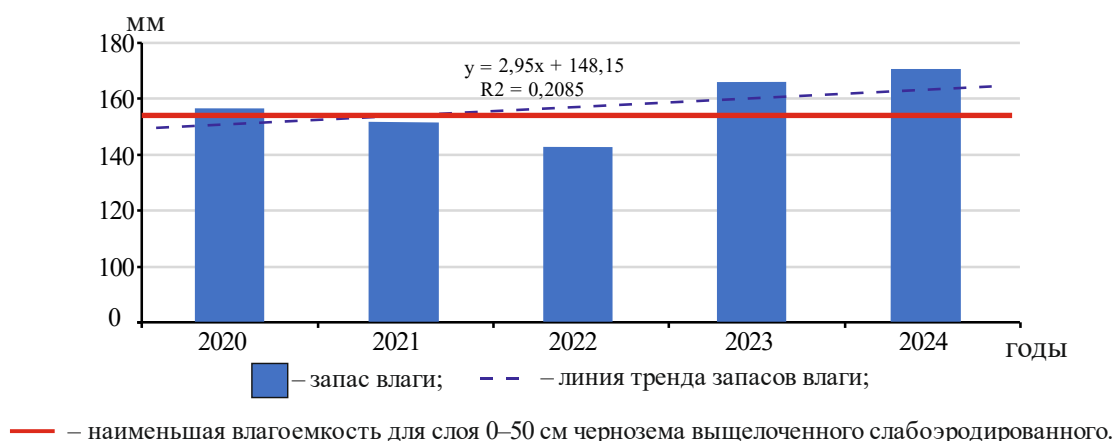


Рисунок 3. Запасы влаги в слое 0–50 см чернозема выщелоченного слабоэродированного после снеготаяния (вторая–третья декада апреля).

Согласно (Герцык, Роде, 1980) под весенним дефицитом влаги подразумевается разница между наименьшей влагоемкостью почвы и запасом почвенной влаги до начала снеготаяния. Схожие условия весеннего состояния влажности почв отметили исследователи северной лесостепи Челябинской области в 2023 году (Кобелькова и др., 2023). Общие запасы влаги в слое 0–100 см серой среднесуглинистой почвы перед снеготаянием не превышали 55 мм при норме 160 мм. Во время весеннего снеготаяния 2023 г. впитывание влаги на среднесуглинистых почвах составляло 1 мм

влаги/час с продвижением на 1 см в нижние слои. Через 1–2 суток после оттаивания почвы наступила фаза физической спелости почвы; однако специалисты отмечают высокую вероятность наступления весенней засухи при отсутствии осадков.

В своих исследованиях Б.А. Дорохов (2024), Н.А. Морозов с соавторами (Морозов и др., 2023) отмечают, что в весенне-летний период происходит возобновление активной вегетации озимой пшеницы и ее развитие от фазы кущения до созревания. На юго-востоке Западной Сибири весенний посев яровых культур начинается со второй декады мая, в период наступления физической спелости почвы. Однако, учитывая тот факт, что после окончания снеготаяния запас влаги в слое 0–50 см пахотных почв может быть аналогичен осеннему, а в отдельные годы не превышать наименьшей влагоемкости, имеются основания предполагать, что большая часть накопленной в зимне-весенний период почвенной влаги, расходуясь на внутрипочвенный сток, фильтрацию и испарение, становится недоступной растениям. В работе, посвященной исследованиям агрофизических свойств Алтайской лесостепи (Татаринцев и др., 2017) показано, что оптимальный диапазон влажности, при котором складываются благоприятные условия жизнедеятельности растений и проявляются полностью их потенциальные возможности, равен 0,9–1,0 НВ.

Осложнять ситуацию может и проведение предпосевных и посевных мероприятий, в ходе которых возможно увеличение непродуктивных потерь влаги из-за ее физического испарения с поверхности почвы. Майские осадки критически важны для большинства сельскохозяйственных культур, особенно для зерновых, так как обеспечивают необходимую для роста влажность почвы и способствуют развитию растений в ключевые периоды вегетации; в это время закладываются главные возможности для формирования будущего урожая.

За последние 80 лет среднемесячное количество осадков на юго-востоке центрально-черноземной зоны России весной увеличилось незначительно – на 3,3 мм в апреле и на 1,2 мм в мае, поэтому можно предположить, что вклад этих месяцев в годовое количество осадков тоже увеличился (Дорохов, 2024). Однако, на юго-востоке Западной Сибири отмечена обратная ситуация. За последнюю четверть века (2001–2024 гг.) доля осадков апреля и мая в общегодовом объеме снизилась на 1,2 и 0,3%, соответственно, по отношению к периоду 1955–2000 гг. (табл. 2). Подобная тенденция отмечена и в работе (Watanabe et al., 2023). Следовательно, можно предположить, что при условии дальнейшего снижения количества осадков в мае, следует ожидать еще больший дефицит запаса почвенной влаги в посевной период. Это может заставить производителей сельскохозяйственной продукции переносить посев зерновых культур на более ранние сроки.

Таблица 2

Среднемноголетний вклад каждого месяца в общегодовой объем атмосферных осадков на юго-востоке Западной Сибири, %

Период	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
1955–2024	4,6	3,6	4,0	5,7	8,4	11,4	15,3	13,6	9,4	9,5	7,9	6,6
1955–2000	4,3	3,2	3,2	6,2	8,5	11,7	15,7	14,5	9,5	9,5	7,4	6,2
2001–2024	5,2	4,2	5,5	5,0	8,2	10,8	14,4	12,1	9,2	9,3	8,8	7,3

ВЫВОДЫ

Несмотря на значительный запас осенней водовместимости полуметрового слоя пахотных черноземов юго-востока Западной Сибири, на тенденцию ежегодного увеличения количества осадков за холодный период в этом регионе и значительный поверхностный сток талых вод во время снеготаяния, в предпосевной и посевной периоды отмечается дефицит почвенной влаги, столь необходимой для сельскохозяйственных культур. Содержание влаги в слоях почвы 0–30 и 0–50 см после снеготаяния на уровне (или ниже) наименьшей влагоемкости говорит об особенности поглощения снеготалых вод черноземами агроценозов юго-востока Западной Сибири. Недостаток запасов почвенной влаги в предпосевной период отмечен в среднем 2 раза в пятилетие.

Наличие внутрипочвенного мерзлотного экрана во время снеготаяния является основной преградой для талых вод, которые могли бы пополнить запас влаги в нижележащих слоях почвы. За

период в 10–25 дней между окончанием снеготаяния и началом полевых работ, под действием нарастающих положительных температур воздуха и прямых солнечных лучей происходит дальнейших расход влаги на испарение из пахотного слоя 0–30 см.

Атмосферные осадки мая очень важны для роста и развития сельскохозяйственных культур в начале вегетационного периода, однако намечающаяся тенденция снижения доли осадков этого месяца в годовом количестве осадков может создавать сложности для формирования высоких и стабильных урожаев зерновых в регионе.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № 121031700316-9).

ЛИТЕРАТУРА

Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А. Методы исследования физических свойств почв и грунтов. Москва: Высшая школа, 1973. 393 с.

Виноградова Г.М., Завалишин Н.Н., Кузин В.И. Изменчивость сезонных характеристик климата Сибири в течение XX века // Оптика атмосферы и океана. 2000. № 06–07. С. 604–607.

Воейков А.И. Колебания климата и уровня озер Туркестана и Западной Сибири. Избранные сочинения. Москва: Изд-во АН СССР, 1952. Том 3. С. 387–412.

Герцык В.В., Роде А.А. Статистическая характеристика элементов баланса влаги черноземов под некосимой степью и дубовым лесом // Почвоведение. 1980. № 7. С. 101–111.

ГОСТ 25358-2012. Грунты. Метод полевого определения температуры. Москва: Стандартинформ, 2013. 19 с.

Дорохов Б.А. Современный климат юго-востока ЦЧЗ и условия выращивания озимой пшеницы // Земледелие. 2024. № 5. С. 21–26. <https://doi.org/10.24412/0044-3913-2024-5-21-26>

Иванов А.Л. Глобальное изменение климата и его влияние на сельское хозяйство России // Земледелие. 2009. № 1. С. 3–5.

Кобелькова Н.И., Тайницких С.В., Громова Л.В., Вдовина Р.А. Ожидаемые условия весны 2023 года в северной лесостепи Челябинской области // Материалы XIII Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых «Достижения и перспективы развития АПК России», посвященная памяти Р.Г. Гареева (Казань, 30–31 марта 2023 г.), 2023. С. 185–187.

Лавров С.А. Влияние климатических изменений на влажность почвы // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2025. № 2. С. 19–39. <https://doi.org/10.35567/19994508-2025-2-19-39>

Морозов Н.А., Ходжаева Н.А., Прохорова И.В., Хрипунов А.И., Общия Е.Н. Влияние условий весенне-летней вегетации и предшественников на урожайность озимой пшеницы в засушливой зоне Ставрополя // Земледелие. 2023. № 4. С. 8–12. <https://doi.org/10.24412/0044-3913-2023-4-8-12>

Носкова Е.В., Обязов В.А., Вахнина И.Л. Изменения приземной температуры воздуха на юге Сибири и их взаимосвязь с крупномасштабными циркуляционными процессами в атмосфере // Географический вестник. 2021. № 2(57). С. 75–84. <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2021-2-75-84>

РД 52.08.730-2010. Руководящий документ. Производство наблюдений над интенсивностью снеготаяния и водоотдачей из снежного покрова. Москва: Росгидромет, 2010.

РД 52.33.760-2011. Руководящий документ. Температура почвы сельскохозяйственных угодий. Обнинск: «ВНИИГМИ-МЦД» 2011. 24 с.

Роде А.А. Основы учения о почвенной влаге. Ленинград: Гидрометеиздат, 1965. Том 1. 663 с.

Танасиенко А.А., Чумбаев А.С., Якутина О.П. Потери талых вод в почвах расчлененной территории юга Западной Сибири // Земледелие. 2017. № 6. С. 11–15.

Танасиенко А.А., Чумбаев А.С., Якутина О.П., Филимонова Д.А. Весенний дефицит влаги в профиле эродированных черноземов в зависимости от увлажнения территории юго-востока Западной Сибири // Почвоведение. 2019. № 8. С. 935–945. <https://doi.org/10.1134/S0032180X19080148>

Татаринцев Л.М., Татаринцев В.Л., Мягкий П.А., Ещенко С.И. Агрофизические условия плодородия агропочв Алтайской лесостепи и модель их эффективного плодородия // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2017. № 2(148). С. 22–29.

Халин А.В. Влияние культур и агротехнологий на продуктивность звеньев севооборотов в условиях степной зоны Южного Урала // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2019. № 5(79). С. 23–26.

Чумбаев А.С., Танасиенко А.А., Кулижский С.П. Особенности гидротермического режима почв Предсалаирья в холодный период года (в пределах Буготакского мелкосопочника) // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2013. № 2(22). С. 23–42. <https://doi.org/10.17223/19988591/22/2>

<https://rp5.ru/> – расписание погоды (дата обращения 13.10.2025).

Watanabe T., Matsuyama H., Kuzhevskaya I. Long-Term trends of extreme climate indexes in the Southern part of Siberia in comparison with those of surrounding regions // Atmosphere. 2023. Vol. 14. No. 7. P. 1131. <https://doi.org/10.3390/atmos14071131>

Поступила в редакцию 14.10.2025

Принята 26.10.2025

Опубликована 28.10.2025

Сведения об авторах:

Чумбаев Александр Сергеевич – кандидат биологических наук, заместитель директора по научной работе, заведующий лабораторией почвенно-физических процессов ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск, Россия); chas30@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2332-402X>

Миллер Герман Федорович – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории почвенно-физических процессов ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск, Россия); miller_1981_gf@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9193-0155>

Соловьев Сергей Викторович – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории почвенно-физических процессов ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск, Россия); solovyev_issa@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8364-9486>

Безбородова Анна Николаевна – кандидат биологических наук, ученый секретарь, старший научный сотрудник лаборатории почвенно-физических процессов ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск, Россия); bezborodova@issa-siberia.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3341-3859>

Гожоев Мунарбек Бактыярович – младший научный сотрудник лаборатории почвенно-физических процессов ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск, Россия); m.gozhoev@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0004-0123-763X>

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.



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

Saturation of agricultural soils with snowmelt waters in the south-east of West Siberia

© 2025 A. S. Chumbaev , G. F. Miller , S. V. Solovyev , A. N. Bezborodova , M. B. Gozhoev

Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Lavrentieva, 8/2, Novosibirsk, Russia. E-mail: chas30@mail.ru

The aim of the study was to evaluate the efficiency of winter precipitation use by soils on slopes in agrocenoses in the south-east of West Siberia during the pre-sowing period.

Location and time of the study. The cis-Salair drained plain and Bugotaktsky upland in the Novosibirsk region. 2019–2024.

Methods. Soil moisture content was determined using the thermostat-gravimetric method in samples taken with a drill to a depth of 150 cm, layer by layer, every 10 cm. Drilling was performed twice. Soil temperature measurement in the field and arrangement of temperature sites were carried out in accordance with GOST 25358-2012 and RD 52.33.760-2011. Autonomous temperature recorders were installed at the temperature site at the depth of 0, 5, 10, 15, 20 cm, then every 20 cm to a depth of 160 cm. The sensors were programmed for a 3-hour temperature measurement interval. Snow cover thickness was determined by regular snow surveys along parallel routes intersecting the catchment area every 100 m (RD 52.08.730-2010). The density and water reserves in the snow on different catena positions were determined in two replicates using a VS-43 snow gauge.

Results. Based on the weather data analysis during cold periods from 2019 to 2024, a continued, stable increase in precipitation, documented earlier by the authors, was established. During the winters studied, the region received an average of 180 mm of precipitation, which is 1.6 times higher than the long-term average. During the years studied, moisture reserves in the 0–50 cm layer of weakly eroded chernozems were below the minimal water-holding capacity, suggesting that the soils entered winter with sufficient water-holding capacity. Snowmelt in the region begins in the first half of April and, depending on the winter snowfall and weather conditions, can last from 5 to 15 days, during which time the soil thaws no more than 30 cm from the surface. By the time of the greatest

surface meltwater runoff, this layer was saturated with meltwater to a moisture content exceeding the full water-holding capacity (thixotropic state). After surface runoff ceased, meltwater was discharged from the soils both deep into the soil profile (assuming the soils had completely thawed) and through subsurface runoff downslope. Exposure to direct sunlight and increasing 24-hour positive air temperatures resulted in additional soil moisture loss through evaporation. As a result, a few days after the end of the snowmelt and surface runoff of meltwater in the 0-30 cm layer of arable soils, moisture reserves were comparable to their autumn levels, and in some years, a deficit (below the minimal water-holding capacity) was observed.

Conclusions. Arable chernozems in south-east of West Siberia may experience soil moisture deficits in the pre-planting period, despite a large reserve of autumn water storage capacity, high precipitation during the cold period, and significant surface runoff of meltwater. Moisture content in the 0-30 and 0-50 cm soil layers after snowmelt, at or below the lowest water-holding capacity after the snowmelt period, indicates a specific absorption pattern of snowmelt water by chernozems in agrocenoses in the studied region. Soil moisture deficits in the pre-planting period on average occur twice per five-year period.

The presence of a subsurface frost barrier during snowmelt is the main barrier to meltwater, which could otherwise replenish moisture in the underlying soil layers. During 10 to 25 days between the end of snowmelt and the start of planting, under the influence of rising temperatures and direct sunlight, valuable moisture from the 0-30 cm layer of arable land is further lost to evaporation. Precipitation in May is crucial for agricultural crops at the beginning of the growing season; however, the emerging trend of a decreasing contribution of precipitation in this month in the total annual precipitation may pose challenges for achieving high and stable grain yields in the region.

Keywords: soil moisture; soil moisture reserve; meltwater runoff; snowmelt; West Siberia; soils; cold period.

How to cite: Chumbaev A.S., Miller G.F., Solovyev S.V., Bezborodova A.N. Gozhoev M.B. Saturation of agricultural soils with snowmelt waters in the south-east of West Siberia. *The Journal of Soils and Environment*. 2025. 8(3). e339. DOI: [10.31251/pos.v8i3.339](https://doi.org/10.31251/pos.v8i3.339) (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).

REFERENCES

- Vadyunina A.F., Korchagina Z.A. Methods for studying the physical properties of soils and grounds. Moscow: Vysshaya shkola, 1973. 393 p. (in Russian).
- Vinogradova G.M., Zavalishin N.N., Kuzin V.I. Variability of seasonal characteristics of climate in Siberia during the twentieth century. *Atmospheric and oceanic optics*. 2000. Vol. 13. No. 06–07. P. 558–561.
- Voeikov A.I. Climate and lake level fluctuations in Turkestan and Western Siberia Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1952. Vol. 3. P. 387–412. (in Russian).
- Gertsyk V.V., Rode A.A. Statistical characteristics of moisture balance elements of chernozems under unmown steppe and oak forest. *Pochvovedenie*. 1980. No. 7. P. 101–111. (in Russian).
- GOST 25358-2012. Soils. Method of field temperature determination. Moscow: Standartinform, 2013. 19 p. (in Russian).
- Dorokhov B.A. Modern climate of the south-east of the Central Chernozem region and conditions for growing winter wheat. *Zemledelie*. 2024. No. 5. P. 21–26. (in Russian). <https://doi.org/10.24412/0044-3913-2024-5-21-26>
- Ivanov A.L. Global climate change and its impact on Russian agriculture. *Zemledelie*. 2009. No. 1. P. 3–5. (in Russian).
- Kobelkova N.I., Tainitskikh S.V., Gromova L.V., Vdovina R.A. Expected conditions of spring 2023 in the northern forest-steppe of the Chelyabinsk region. In book: Proceedings of the XIII All-Russian scientific and practical conference of young scientists "Achievements and prospects for the development of the agro-industrial complex of Russia", dedicated to the memory of R.G. Gareev (Kazan, March 30-31, 2023), 2023. P. 185–187. (in Russian).
- Lavrov S.A. The effect of climate change on soil moisture. Water sector of Russia: problems, technologies, management. 2025. No. 2. P. 19–39. (in Russian). <https://doi.org/10.35567/19994508-2025-2-19-39>
- Morozov N.A., Khodjaeva N.A., Prokhorova I.V., Khripunov A.I., Obshchiya E.N. Influence of the conditions of springsummer vegetation and forecrops on the yield of winter wheat in the arid zone of the Stavropol territory. *Zemledelie*. 2023. No. 4. P. 8–12. (in Russian). <https://doi.org/10.24412/0044-3913-2023-4-8-12>
- Noskova E.V., Obyazov V.A., Vakhnina I.L. Variations in the surface air temperature in the south of Siberia and their relationship with large-scale circulation processes in the atmosphere. *Geographical bulletin*. 2021. No. 2(57). P. 75–84. (in Russian). <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2021-2-75-84>

- RD 52.08.730-2010. Guidance document. Observations of snowmelt intensity and water yield from snow cover. Moscow: Roshydromet, 2010. 20 p. (in Russian).
- RD 52.33.760-2011. Guidance document. Soil temperature of agricultural lands. Obninsk: VNIIGMI-MCD, 2011. 24 p. (in Russian).
- Rode A.A. Fundamentals of the doctrine of soil moisture. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1965. Vol. 1. 663 p. (in Russian).
- Tanasienko A.A., Chumbaev A.S., Yakutina O.P. Meltwater losses in eroded soils of rugged topography of the south of Western Siberia. *Zemledelie*. 2017. No. 6. P. 11–15. (in Russian).
- Tanasienko A.A., Chumbaev A.S., Yakutina O.P., Filimonova D.A. The impact of climatic humidity of the southeastern part of Western Siberia on spring deficit of moisture in the profiles of eroded chernozems. *Eurasian Soil Science*. 2019. Vol. 52. No. 8. P. 935–944. <https://doi.org/10.1134/S1064229319080143>
- Tatarintsev L.M., Tatarintsev V.L., Myagkiy P.A., Yeshchenko S.I. Agrophysical conditions of fertility of agro-soils of the Altai region's forest-steppe and model of their effective fertility. *Bulletin of Altai State Agricultural University*. 2017. No. 2(148). P. 22–29. (in Russian).
- Khalin A.V. Influence of crops and agro-technologies on crop yields in the system of crop rotations under the conditions of South Urals steppe zone. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2019. No. 5(79). P. 23–26. (in Russian).
- Chumbaev A.S., Tanasienko A.A., Kulizhsky S.P. Features of the hydrothermal regime of soils of the Pre-Salair region in the cold period of the year (within the Bugotak small hills). *Tomsk State University Journal of Biology*. 2013. No. 2(22). P. 23–42. (in Russian). <https://doi.org/10.17223/19988591/22/2>
- <https://rp5.ru/> – Weather forecast (accessed on 13.10.2025).
- Watanabe T., Matsuyama H., Kuzhevskaya I. Long-Term trends of extreme climate indexes in the Southern part of Siberia in comparison with those of surrounding regions. *Atmosphere*. 2023. Vol. 14. No. 7. P. 1131. <https://doi.org/10.3390/atmos14071131>

Received 14 October 2025

Accepted 26 October 2025

Published 28 October 2025

About the authors:

Alexander S. Chumbaev – Candidate of Biological Sciences, Deputy Director for Research, Head of the Laboratory of Soil-physical Processes in the Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); chas30@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2332-402X>

German F. Miller – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher in the Laboratory of Soil-physical Processes in the Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); miller_1981_gf@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9193-0155>

Sergey V. Solovyev – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher in the Laboratory of Soil-physical Processes in the Institute of Soil Science and Agrochemistry, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); solovyev_issa@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8364-9486>

Anna N. Bezborodova – Candidate of Biological Sciences, Scientific Secretary, Senior Researcher in the Laboratory of Soil-physical Processes in the Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); bezborodova@issa-siberia.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3341-3859>

Munarbek B. Gozhoev – Junior Researcher in the Laboratory of Soil-physical Processes in the Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia) m.gozhoev@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0004-0123-763X>

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 631.481

<https://doi.org/10.31251/pos.v8i3.325>

Оценка почвенно-экологического состояния посттехногенных ландшафтов добычи алмазов в Якутии

© 2025 А. А. Петров ¹, Г. Н. Саввинов ¹, А. А. Данилова ²

¹Научно-исследовательский институт прикладной экологии Севера им. профессора Д.Д. Саввинова ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова», пр. Ленина, д. 43, г. Якутск, 677000, Россия. E-mail: Petrov_Alexey@mail.ru, savvinov_gn@mail.ru

²Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий РАН, р.п. Краснообск, а/я 356, Новосибирский район, Новосибирская область, 630501, Россия. E-mail: Danilova7alb@yandex.ru

Цель исследования. Оценить почвенно-экологическое состояние самовосстанавливающихся отвалов алмазодобывающей промышленности Якутии для разработки научно-практических рекомендаций по проведению биологического этапа рекультивационных мероприятий.

Место и время проведения. Изучены отвалы вскрышных пород, сформированные при разработке россыпных и коренных месторождений в Северной и Западной Якутии. Отвалы значительно отличаются между собой по рельефу, почвообразующим породам и другим характеристикам. Фактический материал был собран в рамках выполнения НИР НИИПЭС имени профессора Д.Д. Саввинова СВФУ с 2007–2024 гг.

Методы. Применен и модифицирован бонитировочный подход для оценки почвенно-экологического состояния техногенных ландшафтов, предложенный сотрудниками Института почвоведения и агрохимии СО РАН.

Основные результаты. Проведена интегральная оценка индивидуальной специфики отвалов вскрышных пород и перспектив самовосстановления их важнейших почвенно-экологических функций для разработки (или адаптации) методов и технологий рекультивационных мероприятий в условиях криолитозоны Якутии. В целях повышения точности оценки почвенно-экологического состояния предложена модификация вычислений, которая заключается в применении двухступенчатого расчета коэффициента специфичности по физической глине и ввода в формулу расчета показателей, отражающих состояние почвенной микробиоты и растительности.

Заключение. Предложены градации почвенно-экологического состояния посттехногенных ландшафтов Якутии, позволяющие проводить интегральную оценку состояния широкого спектра отвалов для разработки индивидуальных проектов рекультивационных мероприятий.

Ключевые слова: почвенно-экологическое состояние; техногенные ландшафты; почвообразование; рекультивация; эмбриоземы; элювиоземы; алмазодобывающая промышленность; Якутия.

Цитирование: Петров А.А., Саввинов Г.Н., Данилова А.А. Оценка почвенно-экологического состояния посттехногенных ландшафтов добычи алмазов в Якутии // Почвы и окружающая среда. 2025. Том 8. № 3. e325. DOI: [10.31251/pos.v8i3.325](https://doi.org/10.31251/pos.v8i3.325)

ВВЕДЕНИЕ

В 2015 году Генеральная Ассамблея ООН сформулировала 17 целей для обеспечения устойчивого развития мира (Sustainable Development Goals) (Ильин и др., 2015; Урсул А., Урсул Т., 2016). Достижение 13 из них напрямую или опосредованно связано с благополучием почвы (Lal et al., 2021). На пути решения поставленных задач возникают сложнейшие противоречия. С ростом населения Земли возрастает потребность в минеральных и энергетических ресурсах. Соответственно, возрастает активность **добычи полезных ископаемых (ДПИ)**, в процессе которой неизбежно нарушается вся экосистема территории. В обзорах (Worlanyo, Jiangfeng, 2021; Forget, Rossi, 2021) нарушение почвенно-растительного покрова территории признается ключевой проблемой, вызывающей каскад экологических и социально-культурных проблем. Если влияние ДПИ на экономические параметры территории, как правило, положительное, на социальную сферу – обычно неоднозначное, то последствия для окружающей среды всегда негативны. В связи с этим восстановление техногенно нарушенных экосистем становится сложнейшим вызовом XXI века. Огромное разнообразие природных, литогенных условий формирования этих объектов обуславливает практическую невозможность унификации методов рекультивации. Тем не менее, в последние годы в литературе все чаще озвучивается проблема поиска интегральных критериев для оценки состояния **техногенно нарушенных (ТН)** экосистем (Spasić et al., 2021; Gwenzi 2021; Van der Heyde et al., 2020). Для этих целей было предложено использовать интегральный показатель здоровья почвы (SQI)

(Muñoz-Rojas, 2018). Суть метода заключается в измерении большого ряда показателей почвы, оценку их уровня в баллах и вычислении суммы этих баллов (Moebius-Clune et al, 2016). Появились сомнения в корректности данного подхода для оценки ТН экосистем, поскольку сложно найти пределы, ограничивающие список возможных показателей почвы (Gwenzi, 2021). Упомянутые выше авторы считают, что ТН почва является новым объектом, так как ее свойства невозможно приблизить к показателям исходного ненарушенного аналога. Поэтому оценка состояния такого объекта должна основываться на других принципах. Как известно, изучение почвообразовательных процессов на техногенных ландшафтах при первом приближении преследует две цели. Первая теоретическая – изучение начальных этапов образования почвы с исходного, так называемого ноль-момента, вторая прикладная – разработка схем и оценка результатов рекультивационных мероприятий. Если для достижения первой цели является логичным сравнение получаемых сведений с показателями исходной ненарушенной почвы, то для достижения второй корректность данного подхода вызывает сомнения (Gwenzi, 2021; Bennett et al., 2021). Осознавая этот момент, в частности W. Gwenzi (2021), предлагает другой способ, основанный на иерархической оценке состояния экосистемы в целом – функции, статуса, экологических услуг (ecological services). При таком подходе свойства почвы становятся только одним из критериев состояния экосистемы. В этом случае ответ на вопрос – какие свойства экосистемы оценивать, зависит от конечной цели рекультивации – агроиспользование, лесоразведение, рекреация и др. Однако, судя по данным литературы, эти выкладки пока остаются далекими от практического применения (Gatica-Saavedra et al., 2023; Pandey et al., 2023; Garg et al., 2024), в то время как назревшая проблема требует своего решения. Сотрудники Института почвоведения и агрохимии (ИПА) СО РАН (Андроханов и др., 2009; Андроханов и др., 2010; Соколов и др., 2015; Госсен и др., 2016) предложили использовать бонитировочный подход на основе расчета почвенно-экологического состояния техногенных ландшафтов, который был реализован для оценки состояния угольных отвалов на территории Кузбасса. Актуальность решения подобной проблемы чрезвычайно высока и для техногенных ландшафтов криолитозоны, в частности, для территорий, нарушенных при разработке месторождений алмазов. Алмазодобывающая промышленность является одной из традиционных базовых отраслей экономики Республики Саха (Якутия). За 70 лет развития отрасли в Западной Якутии открытым способом разработаны кимберлитовые трубки «Мир», «Интернациональный», «Айхал», «Удачный» и др. Кроме этого, начиная с 1990-х годов, разрабатываются россыпные месторождения алмазов в Северной Якутии. Посттехногенные ландшафты оказывают негативное воздействие на окружающую среду, в связи с чем нуждаются в рекультивационных мероприятиях, в первую очередь, санитарно-гигиенического направления. Для разработки способов и технологий последних, адаптированных к природно-климатическим условиям Якутии, необходима интегральная оценка индивидуальной специфики каждого техногенного ландшафта и перспектив самовосстановления в нем важнейших почвенно-экологических функций. Таким показателем может быть оценка **почвенно-экологического состояния (ПЭС)** техногенного ландшафта.

Цель – оценить почвенно-экологическое состояние самовосстанавливающихся отвалов алмазодобывающей промышленности Якутии для разработки научно-практических рекомендаций по проведению биологического этапа рекультивационных мероприятий.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследований послужили разновозрастные отвалы вскрышных пород, сформированные при разработке россыпных месторождений алмазов в Северной Якутии и коренных месторождений алмазов открытым способом в Западной Якутии. Исследования были проведены на трёх ключевых участках, которые расположены в тундрово-лесной, северотаежной и среднетаежной почвенно-растительных подзонах Якутии (рис. 1). Объекты исследований находятся в зоне сплошного распространения многолетнемёрзлых пород. Согласно климатическому районированию России (Национальный атлас ..., 2007), ключевые участки «Анабарский» и «Айхало-Удачный» входят в Сибирскую область Субарктического пояса, с умеренно холодным, умеренно влажным климатом, а ключевой участок «Мирнинский» входит в континентальную Восточносибирскую область умеренного пояса с умеренно холодным, умеренно влажным климатом.

Технологии разработки россыпных месторождений предопределили техногенный неорельеф и исходный субстрат почвообразования – невысокие отвалы холмовидной, гребневидной и трапецевидной формы с разнообразными условиями почвообразования. Грунты этих отвалов представлены смесью мелкозёма суглинистого гранулометрического состава и гравия.

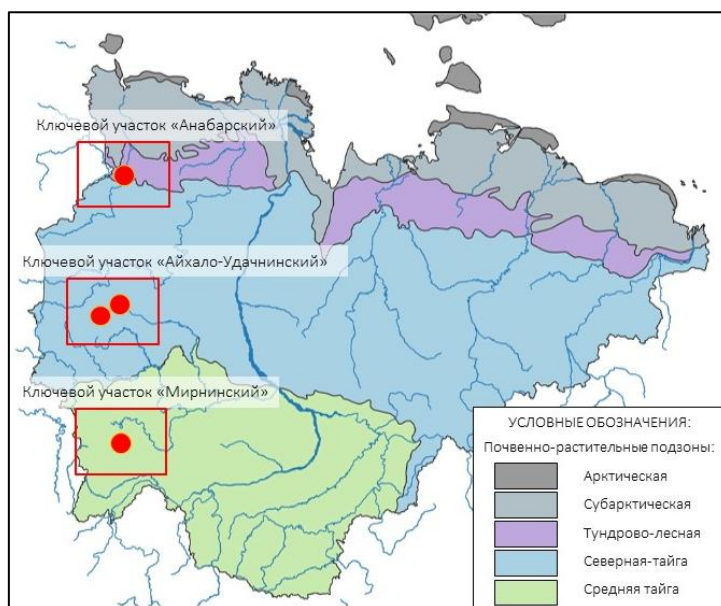


Рисунок 1. Объекты исследований на карте почвенно-растительного зонирования Якутии (Атлас сельского хозяйства ..., 1989).

Согласно ГОСТу 17.5.1.02-85 отвалы вскрышных пород коренных месторождений алмазов Западной Якутии относятся к очень высоким платообразным одно- или многоярусным отвалам трапецевидной формы. Тела отвалов сложены доломитами, известняками, доломитовыми мергелями и алевролитами, которые слабо поддаются выветриванию.

Согласно классификации почв техногенных ландшафтов (Курачев и др., 2002), основу структуры почвенного покрова изученных отвалов составляют представители двух классов, которые подразделяются на шесть типов (табл. 1).

Таблица 1

Систематический список молодых почв отвалов вскрышных пород россыпных месторождений Северной Якутии

Ствол	Класс	Тип
Отвалы россыпных месторождений алмазов в Северной Якутии		
Постлитогенные	Биогенно-неразвитые	Эмбриоземы инициальные
		Эмбриоземы органо-аккумулятивные
		Эмбриоземы дерновые
Отвалы коренных месторождений алмазов в Западной Якутии		
Постлитогенные	Литогенно-неразвитые	Элювиоземы инициальные
		Элювиоземы органо-аккумулятивные
		Элювиоземы мохопокрытые

Техногенные почвы из класса «биогенно-неразвитых» формируются на рыхлых породах отвалов россыпных месторождений алмазов, где получили своё развития эмбриозёмы. Грунты отвалов коренных месторождений алмазов классифицированы как элювиозёмы из класса «литогенно-неразвитых» (табл. 1), при этом элювиоземы инициальные занимают 99–100% от общей площади отвалов.

Оценку состояния объектов провели при помощи расчета ПЭС на основе расчета коэффициентов специфичности согласно методическим рекомендациям (Гуркова и др., 2019).

В целях повышения точности и обоснованности расчета ПЭС в природно-климатических и техногенно-литогенных условиях Якутии данный метод был модифицирован (табл. 2):

1. Для отвалов с сильнокаменистыми грунтами в формулу расчета коэффициентов специфичности по физической глине (Кс.ф.г.) и органическому углероду (Кс.Сорг) было введено уменьшение долей физической глины и органического углерода пропорционально содержанию мелкозема (частиц с размером менее 1 мм), так как физическая глина и органический углероды были определены в мелкоземе.

2. В формулу расчета были добавлены показатели, отражающие активность биологических процессов – коэффициенты специфичности по устойчивости сапротрофного микробного сообщества (КсМбу) и по проективному покрытию растительности (КсПП).

Таблица 2

Модификации расчета почвенно-экологического состояния техногенных ландшафтов для криолитозоны Якутии

Оригинал	Модификации
$\text{Кс. ф. г.} = \frac{\text{Кф. г. э} \times 100}{\text{Кф. г. эталон}}$	$\text{Кс. ф. г.} = \frac{\text{М} \times \text{Кф. г. э} \times 100}{\text{М. эталон} \times \text{Кф. г. эталон}}$
Кс.ф.г. – коэффициент специфичности по содержанию физической глины; Кф.г.э. – содержание физической глины в искомой техногенной почве; Кф.г. эталон – содержание физической глины в почве, принятой за эталон; М – мелкозем, доля фракций с размером менее 1 мм в искомой техногенной почве; М.эталон – мелкозем, доля фракций с размером менее 1 мм в почве, принятой за эталон.	
$\text{Кс. Сорг} = \frac{\text{Сорг} \times 100}{\text{Сорг. эталон}}$	$\text{Кс. Сорг} = \frac{\text{М} \times \text{Сорг} \times 100}{\text{М. эталон} \times \text{Сорг. эталон}}$
Кс.Сорг – коэффициент специфичности по органическому углероду; Сорг – содержание органического углерода в искомой техногенной почве; Сорг.эталон – содержание органического углерода в почве, принятой за эталон; М – мелкозем, доля фракций с размером менее 1 мм в искомой техногенной почве; М.эталон – мелкозем, доля фракций с размером менее 1 мм в почве, принятой за эталон.	
Нет показателя	$\text{КсМбу} = \frac{\text{МБУт} \times 100}{\text{МБУэталон}}$
КсМбу – коэффициент специфичности по устойчивости сапротрофного микробного сообщества; МБУт – устойчивость сапротрофного микробного сообщества в искомой техногенной почве; МБУэталон – устойчивость сапротрофного микробного сообщества почвы, принятого за эталон.	
Нет показателя	$\text{КсПП} = \frac{\text{ППт} \times 100}{\text{ППэталон}}$
КсПП – коэффициент специфичности по проективному покрытию растительности; ППт – проективное покрытие растительности в искомой техногенной почве; ППэталон – проективное покрытие почвы, принятого за эталон.	
$\text{Кс} = \frac{\Sigma(\text{Кс. Рb, Кс. Сорг, Кс. ф. г.})}{3} \times \text{Кс. р}$	$\text{Кс} = \frac{\Sigma(\text{Кс. Рb, Кс. Сорг, Кс. ф. г. Кс. ПП, Кс. Мбу})}{5} \times \text{Кс. р}$
Кс – Объединенный коэффициент специфичности конкретной техногенной почвы; Кс.р – Коэффициент специфичности по рельефу; Кс.ф.г – Коэффициент специфичности по физической глине; Кс.Рb – Коэффициент специфичности по плотности; Кс.Сорг – Коэффициент специфичности по органическому углероду; КсМбу – Коэффициент специфичности по устойчивости сапротрофного микробного сообщества; КсПП – Коэффициент специфичности по проективному покрытию растительности.	

Химические, физико-химические, агрохимические и агрофизические свойства почв определены общепринятыми для почвоведения методами (Аринушкина, 1970; Агрохимические методы ..., 1975; Воробьева, 1998; Хитров, Понизовский, 1990; Вадюнина, Корчагина, 1986) в лаборатории физико-химических методов анализа НИИПЭС СВФУ (Аттестат аккредитации RA.RU.210B4). Картографические материалы созданы и обработаны с помощью программного обеспечения QGIS 3.30.1. Статистический анализ выполнен с использованием программного обеспечения Statistica 10.0. Для классификации техногенных почв применена профильно-генетическая классификация почв техногенных ландшафтов (Курачев, Андроханов, 2002).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При помощи ГИС-технологий были созданы карты рельефа, крутизны и экспозиции склонов отвалов. Определены площади техногенных почв на разных склоновых поверхностях по крутизне (0–5°, 6–15°, 16–35°) и экспозиции (Ю–ЮЗ–З, СЗ–С–СВ, В–ЮВ) (рис. 2). На основе параметров рельефа отвалов рассчитали коэффициенты специфичности по рельефу для всех типов техногенных почв и грунтов (табл. 2). Показатели для отвалов вскрышных пород россыпных месторождений алмазов

составили $K_{с.р.} = 0,85–0,98$ баллов, что отражает благоприятные геоморфологические условия для протекания почвообразовательного процесса. Отвалы вскрышных пород коренных месторождений алмазов обладают также неплохими геоморфологическими условиями ($K_{с.р.} = 0,65–1,00$ баллов).

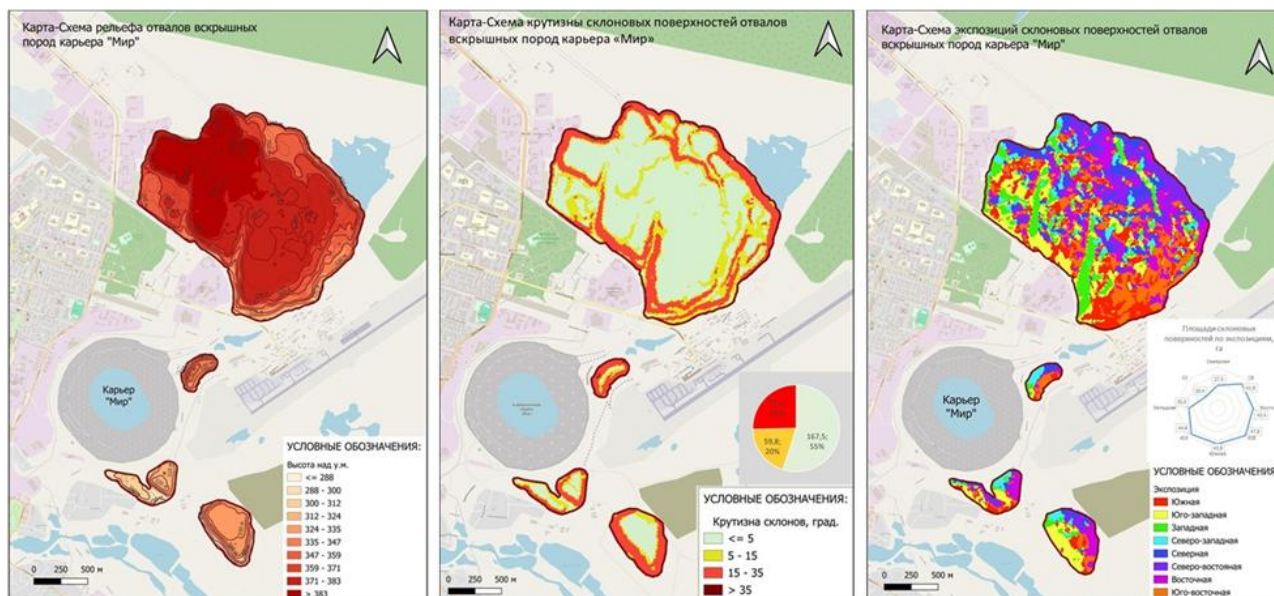


Рисунок 2. Примеры тематических карт параметров рельефа, созданные на основе ArcticDEM (Digital Elevation Model, разрешение 2 м).

Особенности месторождений алмазов и технологии добычи полезных ископаемых привели к формированию отвалов вскрышных пород с разными почвообразующими породами. При разработке россыпных месторождений сформированы отвалы из **потенциально плодородных пород (ППП)**. Разработки кимберлитовых трубок открытым способом вызвали образование отвалов вскрышных пород, состоящих в основном из грубообломочных массивно-кристаллических пород с небольшим содержанием мелкозёма (10–30%) (Петров, 2021).

Применение формулы расчета коэффициента специфичности по физической глине ($K_{с.ф.г.}$) по оригинальной методике (табл. 2) для отвалов с сильнокаменистыми грунтами приводили к некорректным результатам (табл. 3). Так, $K_{с.ф.г.}$ элювиоземов карьера «Айхал» составил 29–51 баллов (оценка удовлетворительная), что не соответствует действительности. Причиной ошибки является высокое содержание физической глины (15–26%) в мелкоземе субстрата. Поэтому в данной формуле мы предлагаем внести некоторые изменения – в расчетах $K_{с.ф.г.}$ долю физической глины уменьшаем пропорционально содержанию мелкозёма (табл. 2). В результате применения модифицированной формулы получили следующие результаты – техногенные почвы отвалов россыпных месторождений алмазов обладают благоприятными условиями по содержанию физической глины ($K_{с.ф.г.} = 71–82\%$). Грунты отвалов вскрышных пород коренных месторождений обладают высокой специфичностью ($K_{с.ф.г.} = 0,4–9\%$).

Важной особенностью эдафических условий почвообразования на отвалах вскрышных пород является плотность сложения техногенных почв и грунтов. Техногенные почвы отвалов вскрышных россыпных месторождений алмазов имеют небольшую специфичность по плотности ($K_{с.Рб} = 75–86\%$). Грунты отвалов вскрышных пород коренных месторождений уплотнены и относительно эталонных почв имеют большую специфичность ($K_{с.Рб} = 31–36\%$) (табл. 3). Сильная уплотнённость грунтов лимитирует процессы самовосстановления отвалов и усложняет проведение рекультивационных мероприятий.

Результатом функционирования посттехногенных ландшафтов является накопление и преобразование органического вещества, поэтому содержание педогенного углерода является важным показателем не только функционирования экосистемы, но и ее способности к самовосстановлению. Так как органический углерод определяется в мелкоземе субстрата, формула расчета коэффициента специфичности по органическому углероду ($K_{с.Сорг}$) для отвалов с сильнокаменистыми грунтами была модифицирована: долю органического углерода пересчитывали пропорционально содержанию мелкозема (табл. 2).

Таблица 3

Итоги расчёта коэффициентов специфичности конкретной техногенной почвы и почвенно-экологического состояния техногенных ландшафтов по оригинальной и модифицированной методике

Типы почв	S,%	Кс по оригинальной методике				Кс по модифицированной методике				КС			ПЭС
		Кс.р.	Кс.Рb	Кс.ф.г	Кс.Сорг	Кс.ф.г	Кс.Сорг	Кс.ПП	Кс.МбУ	Ориг.	Модиф.	Ориг.	Модиф.
Отвалы россыпных месторождений алмазов													
Эмбриоземы инициальные	2,0	0,85	75	99	69	75	53	20	33,3	69	52	71	72
Эмбриоземы органо-аккумулятивные	88,7	0,92	86	82	62	71	54	75	66,6	70	71		
Эмбриоземы дерновые	9,3	0,98	86	93	53	82	46	100	100,0	76	84		
Отвалы коренных месторождений алмазов													
Отвалы карьера «Айхал»													
Элювиоземы инициальные	99,1	0,80	31	51	5	8	1	5	0,0	23	10	23	9,8
Элювиоземы органо-аккумулятивные	0,7	0,65	36	29	7	8	2	20	33,3	15	20		
Элювиоземы мохопокрытые	0,2	1,00	33	32	12	9	4	30	33,3	26	23		
Отвалы карьера «Удачный»													
Элювиоземы инициальные	100	0,79	36	3	13	0,4	2	5	0	14	9,4	14	9
Отвалы карьера «Мир»													
Элювиоземы инициальные	100	0,90	36	11	12	3	3	5	0	18	8,3	18	8

Изученные отвалы вскрышных пород значительно отличаются между собой по содержанию и генезису органического углерода. Грунты отвалов вскрышных пород россыпных месторождений изначально содержат органическое вещество, унаследованное от древних аллювиальных отложений, сохранных многолетней мерзлотой. Эти органогенные вещества вовлекаются в биологический круговорот, что увеличивает потенциал субстрата к самовосстановлению. Эмбриоземы отвалов россыпных месторождений имеют умеренную специфичность по органическому углероду ($K_{с.Сорг} = 46\text{--}54\%$). Грунты отвалов вскрышных пород коренных месторождений не содержат органического углерода, поэтому относительно зональных мерзлотных дерново-карбонатных почв имеют очень высокую специфичность ($K_{с.Сорг} = 1\text{--}4\%$) (табл. 3).

Для уточнения оценок в формулу расчета ПЭС предлагаем ввести показатели состояния растительности и живой фазы почвы. Биогенные факторы почвообразования, чаще всего, выступают в качестве ведущего механизма преобразования исходного субстрата в почву, поэтому сукцессия растительности на техногенных ландшафтах имеет особое значение для развития почвенных процессов. Для оценки ПЭС использовали показатели проективного покрытия растительности. Формула расчета коэффициента специфичности по проективному покрытию растительности ($K_{с.ПП}$) представлена в таблице 2, итоги расчетов приведены в таблице 3. Техногенные почвы россыпных месторождений алмазов по мере своего развития могут достичь 100 % $K_{с.ПП}$ (табл. 3). Проективное покрытие элювиозёмов инициальных отвалов коренных месторождений алмазов составляло 5%; это соответствует 5% $K_{с.ПП}$, что отражает крайне низкую способность грунтов поддерживать рост растений.

Если учет состояния растительного покрова для оценочных целей представляется вполне логичным и относительно распространенным, то введение в формулы расчетов количественных критериев состояния микробного сообщества почвы является существенной новизной наших исследований. Мы рассчитали коэффициент специфичности по устойчивости сапротрофного

микробного сообщества (Кс.МБУ), который отражает отношение показателей устойчивости функционального разнообразия микробного сообщества техногенных почв к зональным почвам. Устойчивость сапротрофной части сообщества определили путем измерения отклика сообщества на стресс (поступление растительных остатков) при помощи мультисубстратного теста (МСТ). Как известно, чем ниже устойчивость системы, тем выше отклик ее показателей на стресс. На наших объектах это положение выражалось в том, что относительное повышение активности микробиоты на внесение растительных остатков составляло убывающий ряд: элювиоземы инициальные – эмбриоземы инициальные – эмбриоземы органо-аккумулятивные – зональная почва (рис. 3). Количественные показатели этой зависимости приведены в таблице 4.

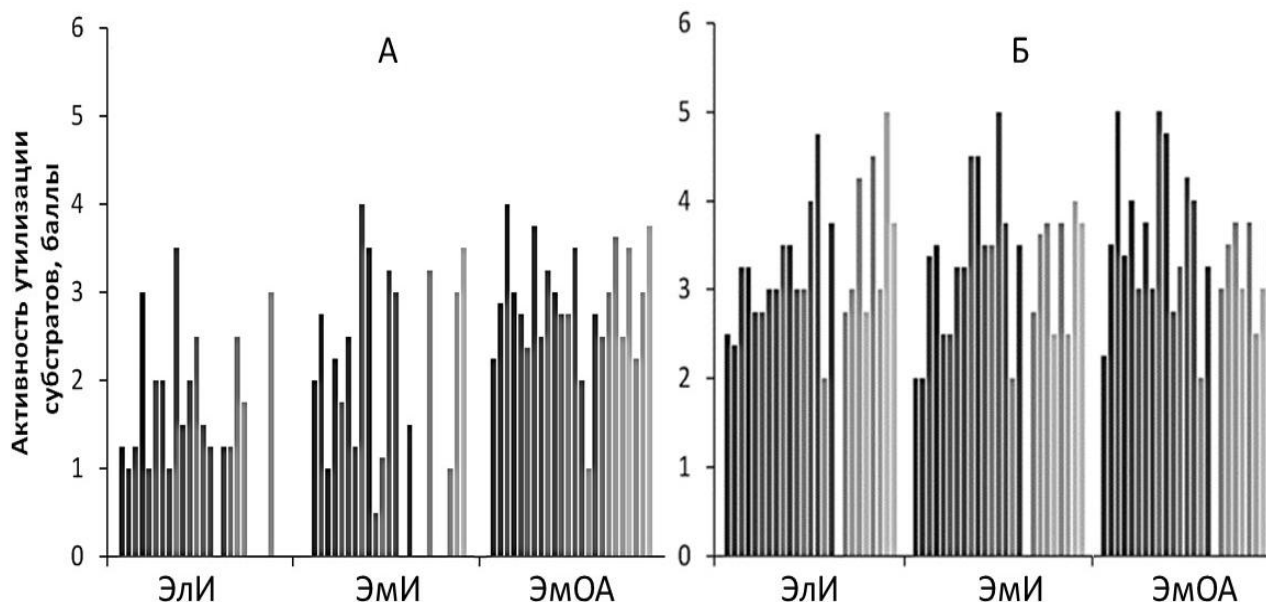


Рисунок 3. Функциональный спектр (активность утилизации питательных субстратов) микробного сообщества молодых почв до (А) и после (Б) стресса. Обозначения: ЭЛИ – элювиоземы инициальные; ЭМИ – эмбриоземы инициальные; ЭМОА – эмбриоземы органо-аккумулятивные. Примечание. На каждом из вариантов столбиками показаны субстраты слева направо: дульцит, инозит, маннит, сорбит, глицерин, мальтоза, лактоза, раффиноза, глюкоза, арабиноза, рамноза, ксилоза, галактоза, фруктоза, сахароза, крахмал, ацетат натрия, цитрат натрия, цитрат аммония, малат калия, тартрат калия-натрия, мочевины, карбоксиметил целлюлоза, ТВИН-80.

Таблица 4

Количественные показатели функционального спектра и устойчивости микробного сообщества молодых почв

Таксоны	Выравненность функционального спектра, единица		Суммарная активность сообщества, баллы		Отклик на стресс		Группа устойчивости
	Исходная	После стресса	Исходная	После стресса	Абсолютное значение, баллы	Относительное значение, %	
Естественные почвы	22	22	57	83	26	50	1
Элювиоземы инициальные	16	23	35	79	45	130	3
Эмбриоземы инициальные	15	23	41	79	38	90	2
Эмбриоземы органо-аккумулятивные	23	23	69	83	15	20	1

Данный способ оценки устойчивости микробного сообщества почвы защищен патентом РФ на изобретение (Данилова и др., 2019). Далее для использования критерия устойчивости в расчетах мы провели некоторое его преобразование. Если принять «высокую» оценку устойчивости (группа 1) за коэффициент специфичности равный 100 ед., а «очень низкую» – за 0 ед., то получим следующий ряд:

Группа устойчивости 1 – 100%;
 Группа устойчивости 2 – 66,6%;
 Группа устойчивости 3 – 33,3%;
 Группа устойчивости 4 – 0%.

Расчет специфичности по устойчивости сапротрофного микробного сообщества (Кс.М6У) производится согласно формуле, приведенной в таблице. 2. Итоги расчетов показаны в таблице 3. Эмбриозёмы отвалов вскрышных пород россыпных месторождений алмазов по устойчивости сапротрофного микробного сообщества обладают слабой специфичностью. В эмбриозёмах дерновых показатель достигал уровня зональных почв, что может быть свидетельством высокой регенерационной способности этих отвалов. Элювиозёмы инициальные отвалов вскрышных пород коренных месторождений алмазов оказались почти стерильными и обладали очень большой специфичностью.

Среднее значение полученных коэффициентов даёт общий коэффициент специфичности конкретной техногенной почвы (Кс) (табл. 2, 3). Далее с учётом соотношения площадей техногенных почв определили ПЭС отвалов.

На наш взгляд, модификация метода расчета ПЭС позволяет провести более корректную оценку показателя для наших объектов. Согласно категорированию авторов метода определения ПЭС отвалы вскрышных пород, сформированные при разработке россыпных месторождений алмазов в Северной Якутии, обладают «хорошим» ПЭС (71 баллов по оригинальной методике и 72 баллов по модифицированной) (табл. 3). Это обусловлено благоприятными литогенными и геоморфологическими условиями. Исходные грунты этих отвалов поддерживают рост высших растений и развитие почвенной микробиоты. Совокупность этих условий позволяет эмбриозёмам достичь стадии «дернообразования» за 10–20 лет.

Отвалы вскрышных пород коренных месторождений алмазов, согласно расчетам по оригинальной методике, обладают «удовлетворительной» (14–23 баллов) ПЭС, что не соответствует действительности, так как эти отвалы на протяжении 25–35 лет остаются техногенной пустыней. Модификация метода позволила более корректно оценить ПЭС этих объектов. По результатам расчетов эти отвалы обладают «неудовлетворительным» ПЭС (8-9,8 баллов) (табл. 3). Это связано с преобладанием негативных литогенных условий над относительно благоприятными геоморфологическими условиями. Субстрат отвалов не поддерживает рост высших растений и развитие микробиоты. На основании вышесказанного можно сделать вывод, что отвалы вскрышных пород коренных месторождений алмазов Западной Якутии не поддерживают почвообразовательный процесс.

Введение дополнительных коэффициентов (Кс.ПП и Кс.М6У) позволяет выявлять факторы почвообразования, оказывающие наибольшее воздействие на развитие биологических процессов. Это позволит рекомендовать способы рекультивации, снижающие те или иные негативные факторы, что может повысить экологическую и экономическую эффективность рекультивационных мероприятий. По тесноте связи с суммой коэффициентов проективного покрытия растительности и устойчивости микробного сообщества изученные физико-химические факторы составили убывающий ряд: плотность – физическая глина – общий углерод – рельеф (табл. 5).

Таблица 5

Корреляционный анализ взаимоотношений коэффициентов специфичности техногенных ландшафтов Якутии

	Кс.р.	Кс.Рb	Кс.ф.г	Кс.Сорг	Кс.ПП+Кс.М6У
Кс.р.	1,00				
Кс.Рb	0,21	1,00			
Кс.ф.г	0,20	0,93	1,00		
Кс.Сорг	0,07	0,77	0,59	1,00	
Кс.ПП+Кс.М6У	0,31	0,84	0,76	0,70	1,00

Определение ПЭС отвалов вскрышных пород и анализ факторов позволили составить градации почвенно-экологического состояния отвалов вскрышных пород алмазодобывающей промышленности Якутии (табл. 6) и сопряженные с ним схемы биологического этапа рекультивационных мероприятий.

Таблица 6

Градации почвенно-экологического состояния отвалов вскрышных пород алмазодобывающей промышленности Якутии

Баллы ПЭС	Категория	Характеристика	Схемы биологического этапа рекультивации
50–75	Хорошее	Условия почвообразования благоприятны для развития почв техногенных ландшафтов; за практически приемлемый срок (20 лет) они могут достичь стадии дернообразования.	Отвалы можно оставить под самовосстановление. Биологический этап рекультивационных мероприятий может быть направлен на снижение негативных криогенных и эрозионных процессов.
10–50	Удовлетворительное	Темпы почвообразования медленные; эволюция техногенных почв в течение практически приемлемого срока (20 лет) не продвигается дальше стадии аккумуляции органики. Дальнейшее развитие техногенных почв лимитировано недостаточным развитием микроорганизмов-деструкторов.	Биологический этап рекультивационных мероприятий должен быть направлен на ускорение процессов самовосстановления путём формирования устойчивых растительных сообществ и внесением оптимальных доз минеральных и органических удобрений.
< 10	Неудовлетворительное	Нет условий для протекания процессов почвообразования. Грунты не поддерживают рост высших растений и развитие микробиоты.	Биологический этап рекультивационных мероприятий должен быть направлен на улучшение условий развития техногенных ландшафтов путём формирования технозёмов из ППП, ПСП или материалов из возобновляемых природных ресурсов.

Таким образом, модифицированный бонитировочный подход оказался вполне применимым для оценки состояния техногенно нарушенных почв в криолитозоне Якутии. Основная новизна нашей модификации заключается в разработке количественного критерия состояния живой фазы почвы. В литературе отмечают ограниченность числа исследований, включающих биологические показатели почв для оценки состояния нарушенных экосистем. Объективной причиной этого считают низкую информативность и трудоемкость традиционных показателей биологической активности почвы, а для решения проблемы предлагают применять метагеномные подходы (Garg et al., 2024). Тем не менее, нами показана информативность традиционных методов для характеристики микробной системы почвы для этих целей. Отметим, что отдельные показатели биологической активности почвы (микробная биомасса, дыхательная активность, ферментативная активность и др.) используют для оценки состояния нарушенных экосистем, но высокая вариабельность последних пока не позволяет разработать интегральный оценочный критерий (Pandey et al., 2023). В начальный период исследований мы также проводили апробацию этих методик для наших целей (Данилова и др., 2012). Однако из-за чрезвычайной пестроты свойств субстратов и молодых почв на основе традиционных микробиологических показателей нам не удалось разработать устойчивые оценочные критерии. Разработка способа количественной оценки важнейшего экологического критерия – функциональной устойчивости микробного сообщества почвы позволила в определенной мере приблизиться к решению этой сложной проблемы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В условиях большого разнообразия свойств изученных отвалов вскрышных пород, сформированных при разработке россыпных и коренных месторождений алмазов в криолитозоне Якутии, необходима разработка подходов к интегральной оценке индивидуальной специфики каждого техногенного ландшафта. Эти исследования позволяют оценить перспективы самовосстановления в

отвалах важнейших почвенно-экологических функций, что позволит разработать индивидуальные схемы рекультивационных мероприятий.

В нашей работе модифицирован известный бонитировочный подход к оценке техногенных ландшафтов на угольных отвалах Кузбасса, предложенный сотрудниками ИПА СО РАН. Расчет почвенно-экологического состояния (ПЭС) техногенного ландшафта основан на оценке специфичности молодых почв и грунтов техногенных ландшафтов относительно зональных почв. Повышение точности расчетов ПЭС посттехногенных ландшафтов для условий криолитозоны Якутии достигнуто путем ввода двухступенчатого расчета Кс.ф.г. и показателей, отражающих состояние почвенной микробиоты и растительности – коэффициентов по проективному покрытию растительности и функциональной устойчивости сапротрофного микробного сообщества (Кс.ПП и Кс.МБУ). В итоге нами предложены градации почвенно-экологического состояния посттехногенных ландшафтов Якутии, позволяющие проводить интегральную оценку широкого спектра отвалов для разработки индивидуальных проектов рекультивационных мероприятий.

ЛИТЕРАТУРА

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

Андроханов В.А., Андроханов В.А., Курачев В.М. Почвенно-экологическое состояние техногенных ландшафтов: динамика и оценка. Новосибирск: Издательство Сибирского отделения Российской академии наук, 2010. 224 с.

Андроханов В.А., Курачев В.М. Принципы оценки почвенно-экологического состояния техногенных ландшафтов // Сибирский экологический журнал. 2009. Том 16. № 2. С. 165–169.

Аринушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. Москва: Издательство МГУ, 1970. 240 с.

Атлас сельского хозяйства Якутской АССР. Москва: ГУГК, 1989. 115 с.

Вадюнина А.Ф., Корчагина З.С. Методы исследования физических свойств почв. Москва: Агропромиздат, 1986. 345 с.

Воробьева Л.А. Химический анализ почв. Москва: Издательство МГУ, 1998. 240 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 буроугольных месторождений) // Вестник НГАУ (Новосибирский государственный аграрный университет). 2016. № 2(39). С. 71–82.

Гуркова Е.А., Госсен И.Н., Куляпина Е.Д., Соколов Д.А., Беланов И.П., Андроханов В.А. Методические рекомендации по проведению почвенно-экологического обследования техногенно нарушенных территорий. Новосибирск: Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, 2019. 32 с.

Данилова А.А., Саввинов Г.Н., Данилов П.П., Петров А.А. Биологическая характеристика почвогрунтов многолетних отвалов алмазодобывающей промышленности Якутии // Сибирский экологический журнал 2012. Том 19. № 5. С. 749–756.

Данилова А.А., Легостаева Я.Б., Сивцева Н.Е., Петров А.А. Способ оценки устойчивости сапротрофного микробного сообщества почвы методом мультисубстратного теста // Патент RU 2678876 С2. Заявление: 2017123480, 03.07.2017. Дата публикации: 04.02.2019.

Национальный атлас России: В 4-х томах / А.Д. Думнов, А.А. Кирсанов, Е.А. Киселева [и др.]. Том 2. Москва: ПКО «Картография», 2007. 496 с.

Ильин И.В. Урсул А.Д., Урсул Т.А. Новые глобальные цели устойчивого развития // Вестник Московского университета. Серия 27: Глобалистика и геополитика. 2015. № 3–4. С. 60–84.

Курачев В. М., Андроханов В.А. Классификация почв техногенных ландшафтов // Сибирский экологический журнал. 2002. Том 9. № 3. С. 255–261.

Соколов Д.А., Андроханов В.А., Кулижский С.П., Доможакова Е.А., Лойко С.В. Морфогенетическая диагностика процессов почвообразования на отвалах каменноугольных разрезов Сибири // Почвоведение. 2015. № 1. С. 106–117. <https://doi.org/10.7868/S0032180X15010153>

Петров А.А. Молодые почвы посттехногенных ландшафтов Якутии ров // Проблемы региональной экологии. 2021. № 5. С. 65–67.

Урсул А.Д. Урсул Т.А. Цели устойчивого развития и перспективы глобального управления // Экономика и управление: проблемы, решения. 2016. Том 2. № 7. С. 122–128.

- Bennett J.M., Melland A.R., Eberhard J., Paton C., Clewett J.F., Newsome T., Baillie C. Rehabilitating open-cut coal mine spoil for a pasture system in south east Queensland, Australia: Abiotic soil properties compared with unmined land through time // *Geoderma Regional*. 2021. Vol. 25. e00364. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2021.e00364>
- Forget M., Rossi M. Mining region value and vulnerabilities: Evolutions over the mine life cycle // *The Extractive Industries and Society*. 2021. Vol. 8. No. 1. P. 176–187. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2020.07.010>
- Garg D., Patel N., Rawat A., Rosado A.S. Cutting edge tools in the field of soil microbiology // *Current research in microbial sciences*. 2024. Vol. 6. P. 100226. <https://doi.org/10.1016/j.crmicr.2024.100226>
- Gatica-Saavedra P., Aburto F., Rojas P., Echeverría C. Soil health indicators for monitoring forest ecological restoration: a critical review // *Restoration Ecology*. 2023. Vol. 31. No. 5. e13836. <https://doi.org/10.1111/rec.13836>
- Gwenzi W. Rethinking restoration indicators and end-points for post-mining landscapes in light of novel ecosystems Willis // *Geoderma*. 2021. Vol. 387. P. 114944. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.114944>
- Lal R., Bouma J., Brevik E., Dawson L., Field D.J., Glaser B., Hatano R., Hartemink A.E., Kosaki T., Lascelles B., Monger C., Muggler C., Ndzana G.M., Norra S., Pan, X., Paradelo R., Reyes-Sánchez L.B., Sandén T., Singh B.R., Spiegel H., Yanai J., Zhang J. Soils and sustainable development goals of the United Nations: An International Union of Soil Sciences perspective // *Geoderma Regional*. 2021. Vol. 25. e00398. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2021.e00398>
- Moebius-Clune B.N., Moebius-Clune D.J., Gugino B.K., Idowu O.J., Schindelbeck R.R., Ristow A.J., van Es H.M., Thies J.E., Shayler H.A., McBride M.B., Kurtz K.S.M., Wolfe D.W., Abawi G.S. Comprehensive Assessment of Soil Health. The Cornell Framework. NY: Cornell University, 2016. 134 p.
- Muñoz-Rojas M. Soil quality indicators: critical tools in ecosystem restoration // *Current Opinion Environmental Science & Health*. 2018. Vol. 5. P. 47–52. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2018.04.007>
- Pandey V.C., Ahirwal J., Roychowdhury R., Chaturvedi R. Eco-Restoration of Mine Land. Assessing Mine Restoration Success Using Biological Soil Quality Indicators. Hoboken: John Wiley & Sons, 2023. Chapter 5. P. 153–180. <https://doi.org/10.1002/9781119872283.ch5>
- Spasić M., Borůvka L., Vacek O., Drábek O., Tejnecký V. Pedogenesis problems on reclaimed coal mining sites // *Soil and Water Research*. 2021. Vol. 16. No. 3. P. 137–150. <https://doi.org/10.17221/163/2020-SWR>
- Van der Heyde M., Bunce M., Dixon K., Wardell-Johnson G., White N.E., Nevill P. Changes in soil microbial communities in post mine ecological restoration: Implications for monitoring using high throughput DNA sequencing // *Science of the Total Environment*. 2020. Vol. 749. P. 142262. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142262>
- Worlanyo A.S., Jiangfeng L. Evaluating the environmental and economic impact of mining for post-mined land restoration and land-use: A review // *Journal of Environmental Management*. 2021. Vol. 279. P. 111623. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111623>

Поступила в редакцию 04.08.2025

Принята 17.09.2025

Опубликована 24.09.2025

Сведения об авторах:

Петров Алексей Анатольевич – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник Научно-исследовательского института прикладной экологии Севера им. профессора Д.Д. Саввинова ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова» (Якутск, Россия); Petrov_Alexey@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6863-7548>

Саввинов Григорий Николаевич – доктор биологических наук, главный научный сотрудник, директор Научно-исследовательского института прикладной экологии Севера им. профессора Д.Д. Саввинова ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова» (Якутск, Россия); savvinov_gn@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5324-5410>

Данилова Альбина Афанасьевна – доктор биологических наук, главный научный сотрудник Сибирского федерального научного центра агробиотехнологий РАН (р.п. Краснообск, Новосибирская область, Россия); Danilova7alb@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2212-3074>

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 soil-ecological status of post-technogenic diamond mining landscapes in Yakutia

© 2025 A. A. Petrov ¹, G. N. Savvinov ¹, A. A. Danilova ²

¹Institute of Applied Ecology of the North, North-Eastern Federal University, Lenin Avenue, 43, Yakutsk, Russia.
E-mail: Petrov_Alexey@mail.ru, savvinov_gn@mail.ru

²Siberian Federal Scientific Centre of Agro-BioTechnologies of the RAS, Krasnoobsk, 356, Novosibirsk Region, Russia,
E-mail: Danilova7alb@yandex.ru

The aim of the study was to assess the soil-ecological status of self-restoring diamond mining spoils of Yakutia for the optimization of reclamation activities.

Location and time of the study. In Northern and Western Yakutia, waste rock spoils formed during the placer and primary mining were studied. The spoils differ significantly in relief, bed rock and other properties. The experimental material was obtained as part of the research work of the Scientific Research Institute of Applied Ecology of the North named after prof. D.D. Savvinov of the North-Eastern Federal University in 2007–2024.

Methods. To assess the soil-ecological status of technogenic landscapes in the cryolithozone, the bonitation approach developed by the Institute of Soil Science and Agrochemistry (SB RAS, Novosibirsk, Russia) was modified and used.

Results. The integrated assessment of individual specificity of diamond mining spoils is presented to determine the prospects for self-restoration of the most important soil-ecological functions. The purpose of this assessment was to develop novel or adapt existing technologies for reclamation in the permafrost zone of Yakutia. In order to improve the accuracy of the soil-ecological status assessment, a modification of the calculations is proposed, namely, a) a two-stage calculation of the specificity coefficient for physical clay, and b) entering into the formula for calculating the soil-ecological indicators related to the status of soil microbiota and vegetation.

Conclusions. A gradation of the soil-ecological status of post-technogenic landscapes of Yakutia is proposed, allowing an integrated assessment of the status of a wide range of diamond mining spoils for better targeting reclamation technologies.

Keywords: soil-ecological status; technogenic landscapes; soil formation; reclamation; embryozems; eluviozems; diamond mining industry; Yakutia.

How to cite: Petrov A.A., Savvinov G.N., Danilova A.A. Assessment of soil-ecological status of post-technogenic diamond mining landscapes in Yakutia. *The Journal of Soils and Environment*. 2025. 8(3). e325. DOI: [10.31251/pos.v8i3.325](https://doi.org/10.31251/pos.v8i3.325) (in Russian with English abstract).

REFERENCES

- Agrochemical methods of soil research. Moscow: Nauka Publ., 1975. 656 p. (in Russian).
- Androkhanov V. A., Kurachev V. M. Soil-ecological state of technogenic landscapes: dynamics and assessment. Novosibirsk: Publishing house of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2010. 224 p. (in Russian).
- Androkhanov V.A., Kurachev V.M. Principles of the evaluation of soil-ecological state of technogenic landscapes. *Sibirskij Ekologicheskij Zhurnal*. 2009. Vol. 16. No. 2. P. 165–169. (in Russian).
- Arinushkina E.V. Guide to chemical analysis of soils. Moscow: Moscow State University Publishing House, 1970. 240 p. (in Russian).
- Atlas of Agriculture of the Yakut Autonomous Soviet Socialist Republic. Moscow: GUGK, 1989. 115 p. (in Russian).
- Vadyunina A.F., Korchagina Z.S. Methods for studying the physical properties of soils. Moscow: Agropromizdat, 1986. 345 p. (in Russian).
- Vorobyova L.A. Chemical analysis of soils. Moscow: Moscow State University Publishing House, 1998. 240 p. (in Russian).
- Gossen I.N., Kulizhsky S.P., Danilova E.B., Sokolov D.A. Bonitation 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 NSAU (Novosibirsk State Agrarian University)*. 2016. No. 2(39). P. 71–82. (in Russian).
- Gurkova E.A., Gossen I.N., Kulyapina E.D., Sokolov D.A., Belanov I.P., Androkhanov V.A. Methodological recommendations for conducting soil-ecological surveys of technogenically disturbed areas. Novosibirsk: Institute of Soil Science and Agrochemistry SB RAS, 2019. 32 p. (in Russian).
- Danilova A.A., Savvinov G.N., Danilov P.P., Petrov A.A. Biological characterization of soil dumps in diamond-mining industry of Yakutia. *Sibirskij Ekologicheskij Zhurnal*. 2012. No. 5. P. 749–756. (in Russian).

- Danilova A.A., Legostaeva Ya.B., Sivtseva N.E., Petrov A.A. Method for assessing the stability of the saprotrophic microbial community of soil using the multisubstrate test method. Patent RU 2678876 C2. Application: 2017123480, 03.07.2017. Publication date: 04.02.2019. (in Russian).
- National Atlas of Russia: In 4 volumes / A.D. Dumnov, A.A. Kirsanov, E.A. Kiseleva et al. Vol. 2. Moscow: Cartography, 2007. 496 p. (in Russian).
- Ilyin I.V., Ursul A.D., Ursul T.A. New global goals for sustainable development. Bulletin of Moscow University. Series 27: Global Studies and Geopolitics. 2015. No. 3–4. P. 60–84. (in Russian).
- Kurachev V.M., Androkhonov V.A. Classification of Soils of Technogenous Landscapes. Sibirskij Ekologicheskij Zhurnal. 2002. Vol. 9. No. 3. P. 255–261. (in Russian).
- Sokolov D.A., Androkhonov V.A., Kulizhskii S.P., Loiko S.V., Domozhakova E.A. Morphogenetic diagnostics of soil formation on tailing dumps of coal quarries in Siberia. Eurasian Soil Science. 2015. Vol. 48. No. 1. P. 95–105. <https://doi.org/10.1134/S1064229315010159>
- Petrov A.A. Young soils of post-technogenic landscapes of Yakutia. Regional environmental issues. 2021. No. 5. P. 65–67. (in Russian).
- Ursul A.D., Ursul T.A. Sustainable development goals and prospects for global governance. Ekonomika i upravlenie: problemy, resheniya. 2016. Vol. 2. No. 7. P. 122–128. (in Russian).
- Bennett J.M., Melland A.R., Eberhard J., Paton C., Clewett J.F., Newsome T., Baillie C. Rehabilitating open-cut coal mine spoil for a pasture system in south east Queensland, Australia: Abiotic soil properties compared with unmined land through time. Geoderma Regional. 2021. Vol. 25. e00364. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2021.e00364>
- Forget M., Rossi M. Mining region value and vulnerabilities: Evolutions over the mine life cycle. The Extractive Industries and Society. 2021. Vol. 8. No. 1. P. 176–187. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2020.07.010>
- Garg D., Patel N., Rawat A., Rosado A.S. Cutting edge tools in the field of soil microbiology. Current research in microbial sciences. 2024. Vol. 6. P. 100226. <https://doi.org/10.1016/j.crmicr.2024.100226>
- Gatica-Saavedra P., Aburto F., Rojas P., Echeverría C. Soil health indicators for monitoring forest ecological restoration: a critical review. Restoration Ecology. 2023. Vol. 31. No. 5. e13836. <https://doi.org/10.1111/rec.13836>
- Gwenzi W. Rethinking restoration indicators and end-points for post-mining landscapes in light of novel ecosystems Willis. Geoderma. 2021. Vol. 387. P. 114944. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.114944>
- Lal R., Bouma J., Brevik E., Dawson L., Field D.J., Glaser B., Hatano R., Hartemink A.E., Kosaki T., Lascelles B., Monger C., Muggler C., Ndzana G.M., Norra S., Pan, X., Paradelo R., Reyes-Sánchez L.B., Sandén T., Singh B.R., Spiegel H., Yanai J., Zhang J. Soils and sustainable development goals of the United Nations: An International Union of Soil Sciences perspective. Geoderma Regional. 2021. Vol. 25. e00398. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2021.e00398>
- Moebius-Clune B.N., Moebius-Clune D.J., Gugino B.K., Idowu O.J., Schindelbeck R.R., Ristow A.J., van Es H.M., Thies J.E., Shayler H.A., McBride M.B., Kurtz K.S.M., Wolfe D.W., Abawi G.S. Comprehensive Assessment of Soil Health. The Cornell Framework. NY: Cornell University, 2016. 134 p.
- Muñoz-Rojas M. Soil quality indicators: critical tools in ecosystem restoration. Current Opinion in Environmental Science & Health. 2018. Vol. 5. P. 47–52. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2018.04.007>
- Pandey V.C., Ahirwal J., Roychowdhury R., Chaturvedi R. Eco-Restoration of Mine Land. Assessing Mine Restoration Success Using Biological Soil Quality Indicators. Hoboken: John Wiley & Sons, 2023. Chapter 5. P. 153–180. <https://doi.org/10.1002/9781119872283.ch5>
- Spasić M., Borůvka L., Vacek O., Drábek O., Tejnecký V. Pedogenesis problems on reclaimed coal mining sites. Soil and Water Research. 2021. Vol. 16. No. 3. P. 137–150. <https://doi.org/10.17221/163/2020-SWR>
- Van der Heyde M., Bunce M., Dixon K., Wardell-Johnson G., White N.E., Nevill P. Changes in soil microbial communities in post mine ecological restoration: Implications for monitoring using high throughput DNA sequencing. Science of the Total Environment. 2020. Vol. 749. P. 142262. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142262>
- Worlanyo A.S., Jiangfeng L. Evaluating the environmental and economic impact of mining for post-mined land restoration and land-use: A review. Journal of Environmental Management. 2021. Vol. 279. P. 111623. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111623>

Received 04 August 2025

Accepted 17 September 2025

Published 24 September 2025

About the authors:

Alexey A. Petrov – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher in the Institute of Applied Ecology of the North, North-Eastern Federal University (Yakutsk, Russia); Petrov_Alexey@mail.ru

Grigory N. Savvinov – Doctor of Biological Sciences, Chief Researcher, Director in the Institute of Applied Ecology of the North, North-Eastern Federal University (Yakutsk, Russia); savvinov_gn@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5324-5410>

Albina A. Danilova – Doctor of Biological Sciences, Principal Researcher in the Siberian Federal Scientific Centre of Agro-BioTechnologies of the Russian Academy of Sciences (Krasnoobsk, Novosibirsk Region, Russia); Danilova7alb@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2212-3074>

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/)

**Постмелиоративное состояние темно-каштановой почвы рисового севооборота**

© 2025 О. С. Безуглова ¹, А. В. Кушнарева ², С. Н. Горбов ¹, А. А. Омелянчук ²,
С. С. Тагивердиев ¹

¹ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет», пр. Стачки 194/1, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия. E-mail: lola314@mail.ru

²Министерство природных ресурсов и экологии Ростовской области, пр. 40-летия Победы, 1а, г. Ростов-на-Дону, 344065, Россия. E-mail: avknadzor@list.ru

Цель исследования. Выявить изменения в состоянии и свойствах темно-каштановой почвы участка Пролетарской оросительной системы, выведенного из орошения под рис в 2003 году.

Место и время проведения. Ростовская область, Пролетарская оросительная система. Исследования проводили в 2002 и 2023–2024 гг.

Методы. В почвенных разрезах проведены морфометрические исследования (определение мощности и морфологическое описание генетических горизонтов). В почвенных образцах определили: pH водной суспензии, карбонаты; массовую долю органического вещества; содержание обменных натрия, кальция и магния, а также сульфатов гипса.

Основные результаты. За 20 лет постмелиоративного периода произошли изменения в морфологических и химических свойствах темно-каштановой почвы. После 2003 года участок использовался в полевом севообороте без орошения. Изменение водного режима с ирригационно-промывного, существовавшего при выращивании риса, на десуктивно-выпотной привело к накоплению в нижней части профиля сульфатов магния, натрия и кальция. Окарбоначивание почвенного профиля доказывают как значительное увеличение содержания карбонатов по всему почвенному профилю, так и наличие в почвенном профиле горизонта со скоплениями крупных карбонатных сгустков. В виде крупных друз на глубине 90–130 см появился гипс, а в почве залежного участка мелкие кристаллы гипса видны по всему профилю. Сульфатный состав залегающих на глубине 2,5 метра грунтовых вод обусловил процесс загипсовывания всего почвенного профиля. В нижней части профиля темно-каштановой почвы к процессу загипсовывания на обоих участках присоединяется слабое осолонцевание, а в почве бывшего рисового севооборота и сильная степень сульфатного засоления.

Заключение. Изменение ирригационно-промывного типа водного режима на десуктивно-выпотной в условиях семиаридного климата при условии близкого залегания к поверхности грунтовых вод гидрокарбонатно-сульфатного состава сопровождается окарбоначиванием, загипсованием, слабым осолонцеванием и глубоким засолением почвенного профиля темно-каштановых почв.

Ключевые слова: Ростовская область; Пролетарская оросительная система; темно-каштановая почва; постмелиоративное состояние; окарбоначивание; загипсование; осолонцевание.

Цитирование: Безуглова О.С., Кушнарева А.В., Горбов С.Н., Омелянчук А.А., Тагивердиев С.С. Постмелиоративное состояние темно-каштановой почвы рисового севооборота // Почвы и окружающая среда. 2025. Том 8. № 3. е328. DOI: [10.31251/pos.v8i3.328](https://doi.org/10.31251/pos.v8i3.328)

ВВЕДЕНИЕ

Длительное использование земель для выращивания риса приводит к значительным изменениям в свойствах почв (Du et al., 2023; Nascimento et al., 2026), обусловленным, прежде всего, высоким гидроморфизмом, связанным с продолжительным затоплением и неглубоким залеганием грунтовых вод. Это приводит к формированию специфических водно-физических свойств, благоприятных для выращивания риса, но вызывает ряд негативных последствий в состоянии этих почв (Кушнарева, Безуглова, 2023; Liu et al., 2024, 2025; Wen et al., 2025).

Прекращение орошения почв под рис вызывает также ряд изменений в их свойствах (Кушнарева, Безуглова, 2023; Nascimento et al., 2026). Так, в лугово-черноземной почве, выведенной из рисового севооборота под выращивание богарных культур, наблюдаются изменения физических (плотность сложения, общая пористость, аэрируемость) и химических (содержание подвижного фосфора, обменного магния, двух- и трехвалентного железа, углерода гуминовых кислот и фульвокислот, отношения Са:Mg и Сгк:Сфк), сближающие ее с аналогом неорошаемого участка (Гуторова, 2020; Кушнарева, Безуглова, 2024; Безуглова и др., 2024).

По данным Н.Б. Хитрова с соавторами (2020), на четвертый год после прекращения орошения почвы лугово-каштановых солонцовых комплексов Присивашской низменности в Нижнегорском

районе Республики Крым, более 90% точек опробования были представлены незасолёнными почвами до глубины 1,5–2 м, а в 80% случаев – незасолёнными грунтами зоны аэрации; грунтовые воды вскрывались преимущественно на глубине 3,3–5,3 м.

Согласно исследованиям, проведенным на Генеральской ОС в Волгоградской области (Хитров и др., 2022), за 25 лет отсутствия орошения произошло понижение уровня грунтовых вод глубже 5 м и рассоление вторично засоленных почв, развитие ощелачивания верхних горизонтов современных почв. Однако в 2020 г. в некоторых почвах отмечено присутствие хлоридов кальция. Их наличие является критерием частичного сохранения следов вторичного засоления, возникшего к 1990-м годам.

В целом можно констатировать, что затопление почв на длительный срок приводит к созданию в них обстановки глубокого анаэробнозиса, влияющего на солевой состав, состав обменных катионов и направленность процессов гумусообразования, обуславливая изменение как запасов гумуса в почвах рисовых полей, так и его качественного состава (Осипов, 2016). Следовательно, выведение полей из состава рисовых севооборотов и изменение водно-воздушного и окислительно-восстановительного режимов сопровождается существенными преобразованиями состава и свойств почв.

Однако работ по постмелиоративному состоянию почв в настоящее время немного, вопрос малоизучен, в связи с чем целью данной работы стало выявление изменений в постмелиоративном состоянии темно-каштановой почвы Пролетарской оросительной системы, обусловленных выведением в 2023 году части полей из орошения под рис и использованием их для возделывания полевых культур без орошения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Территория исследования. Значительная часть Ростовской области находится в степной полусухой и сухой зонах, а юго-восток области относят к сухостепной очень сухой зоне, где распространены темно-каштановые и каштановые, часто засоленные и солонцеватые почвы и комплексы с солонцами в долинах рек Маныч и Сал. Почвенный покров в районах пограничных с Республикой Калмыкия занимают светло-каштановые почвы, залегающие преимущественно в комплексах с солонцами. Исследования проводили в Пролетарском районе Ростовской области в зоне распространения темно-каштановых почв, которые встречаются на Доно-Сальском междуречье, Сало-Манычском водоразделе. Обычно этот подтип каштановых почв представлен несолонцеватыми или солонцеватыми родами в комплексах с солонцами.

Рельеф. Комплексности почвенного покрова способствуют рельеф территории, хорошо выраженный микрорельеф и очень сухой климат. На юго-восток области заходит возвышенность Ергени, вдоль долины Маныча выделяется невысокая Сало-Манычская гряда, остальная часть занята низменностями (Чибилев, 2017). Долина Маныча расположена в Донской сухостепной провинции, почвенный покров ее отличается ярко выраженной комплексностью, обусловленной влиянием как природных, так и антропогенных факторов. При этом ведущую роль играет сухой климат и разные формы микрорельефа: неравномерное распределение находящихся в минимуме атмосферных осадков обуславливает разный режим поверхностного увлажнения. Способствует этому и солевой состав почвообразующих пород; свой вклад вносит распашка целинных земель и использование для орошения вод повышенной минерализации (Ильина, Сушко, 2019).

Рельеф территории зоны орошения сравнительно спокойный с небольшими уклонами поверхности. Система находится в долине р. Западный Маныч, для которой характерны близкий к поверхности уровень залегания грунтовых вод (2–7 м) и высокая их минерализация: до 73 г/л на первой надпойменной террасе и до 22 г/л – на второй надпойменной террасе реки Западный Маныч.

Климат. Согласно агроклиматическому районированию (Агроклиматические ресурсы ..., 1972) – район сухой. В летний период (июнь – август) вероятность засух 25–50 %. Климатическое районирование относит территорию к Азовско-Донскому степному району. В июле средняя месячная температура воздуха 21°C, средняя максимальная/минимальная температура воздуха в июле 38°C/14°C. Средняя продолжительность теплого периода 250 дней, безморозного периода – 175 дней. Годовые значения суммарной солнечной радиации составляют 4800 МДж/м², наибольшие в июне и июле (680 МДж/м²), наименьшие – в январе 120 МДж/м². Средний годовой балл облачности менее 7. Средняя годовая относительная влажность воздуха 65 %, летом она опускается в среднем до 40–50 %, а в отдельные часы до 30–35 %.

Ближайшая репрезентативная метеостанция к Пролетарскому району находится в соседнем Мартыновском районе Ростовской области. За последние тридцать лет длительных наблюдений в

периоды 1961–1990 и 2016–2020 гг. на Мартыновской метеостанции установлено, что сумма атмосферных осадков в исследуемой зоне в указанные периоды оставалась равной 243 мм. Однако дефицит увлажнения увеличился с 542 до 709 мм (Безуглова и др., 2022). При этом коэффициент увлажнения снизился с 0,31 до 0,26. За указанный период испаряемость увеличилась с 785 до 952 мм.

Несмотря на то, что количество осадков в разные периоды оставалось равным, испаряемость возросла и значительно превышает сумму атмосферных осадков: усредненный показатель в период 2016–2020 гг. вырос почти в 4 раза. Основное количество осадков выпадает зимой (январь 40 мм) и в теплый период (в мае, июне средняя месячная сумма 60–70 мм). Самые сухие месяцы апрель и август–сентябрь (35 мм). Средняя продолжительность сухих периодов (максимальное число последовательных дней в году с осадками менее 1 мм) составляет 10–20 дней, а максимальная 75 дней. Наиболее неблагоприятные погодно-климатические явления для сельскохозяйственного Пролетарского региона: холодная весна и весенние заморозки, промерзание почвы при отсутствии снежного покрова, волны жары, засуха (особенно весенняя), высыхание травы и ландшафтные пожары, уменьшение стока р. Маныч, ветровая эрозия, частые пыльные бури (Nazarenko, 2023; Zhidkova et al., 2020).

Почвы. Почвенный покров территории отличается значительной пестротой и комплексностью, так как она расположена на стыке двух почвенных зон – черноземов южных и темно-каштановых почв. Почвообразующими породами служат карбонатные и карбонатно-сульфатные лессовидные суглинки и глины, а также глинистые и тяжелосуглинистые отложения аллювиального происхождения (Попов, 2018; Кушнарева, Омелянчук, 2024). Территория района исследований находится в зоне каштанового типа почвообразования. Основным фон составляют темно-каштановые почвы (Классификация ..., 1977), что соответствует черноземам текстурно-карбонатным по классификации почв России (2004) и *Haplic Kastanozems (Pachic)* по международной классификации IUSS Working Group WRB (2022). Почвы нередко образуют комплексы с солонцами от 10 до 50% и лугово-каштановыми почвами – до 10%. Мощность горизонтов А+В составляет 45–55 см, на рисовых чеках за счет планирования поверхности гумусовая толща чаще всего не превышает 35–40 см, в окраске преобладают серовато темно-каштановые тона, буряющие книзу. Дифференциация гумусовых горизонтов более четкая, чем в черноземах, отмечается значительная уплотненность профиля, трещиноватость гор. В. Содержание гумуса в пахотном слое от 3,2 до 4,0 % с уменьшением в подпахотных горизонтах до 1,7 %. По гранулометрическому составу темно-каштановые почвы этой территории преимущественно глинистые и тяжелосуглинистые. Где-то здесь

Среди темно-каштановых почв встречаются несолонцеватые и слабосолонцеватые разновидности почв; поглощенный натрий составляет от 2,8 до 6,0% от суммы поглощенных оснований в подпахотном горизонте В. Почти повсеместно почвы засолены, тип засоления сульфатный, хлоридно-сульфатный или сульфатно-хлоридный со «следами» соды.

Пролетарская оросительная система. Почвенно-климатические условия изучаемой территории: температурный режим, близость источников воды (Веселовское, Манычское водохранилища, Донской магистральный канал) создают благоприятные условия для развития рисосеяния. Эта зона недостаточного и неустойчивого увлажнения, поэтому всегда считалась перспективной в отношении оросительных мелиораций.

За водоподачу на северные рисовые чеки площадью более 20 тыс. га отвечает Пролетарская **оросительная система (ОС)**, которая является одной из наиболее водоемких в Ростовской области (Сенчуков, Пономаренко, 2022). Она была построена в 1960 г., а полностью сдана в эксплуатацию в мае 1965 года. Вода в систему подается самотеком из Донского магистрального канала через шлюз-регулятор в Пролетарский распределитель протяженностью 83 км и пропускной способностью 54 м³/с. Средняя оросительная норма для Пролетарского массива составляет 22,0–23,5 тыс. м³/га (Пономаренко, Бреева, 2016; Кушнарева, Омелянчук, 2024).

В административном отношении ОС находится на территории Мартыновского и Пролетарского районов Ростовской области на ранее «бросовых» землях Манычской долины. В 2003 году часть полей в ОПХ «Пролетарское» (ныне это АКЦ «Донской») были выведены из режима орошения для возделывания в богарном режиме полевых культур. Уровень грунтовых вод установился на глубине 2,8–2,9 м. Учитывая легкосуглинистый состав почвенно-грунтовой толщи, а также характер накопления солей в почвенном профиле, можно сделать вывод о наличии капиллярного подъема грунтовой воды на глубину 1,5–0,9, а в отдельные наиболее влажные годы и выше (до 0,3–0,5 м). Это позволяет предположить смену ирригационно-промывного типа водного режима, существовавшего в период выращивания риса, на десуктивно-выпотной тип.

Методы исследования. Для изучения изменения свойств темно-каштановых почв зоны действия Пролетарской ОС при орошении проводились почвенные исследования на территории опытно-производственного хозяйства «Пролетарское». Почвы участка, на котором были заложены полевые опыты, темно-каштановые солонцеватые в комплексе с солонцами до 25%. Почвенные разрезы закладывали в 2002 и 2023 гг. В почвенных разрезах проведены морфометрические исследования: определение мощности и морфологическое описание генетических горизонтов. Закладка разрезов и описание свойств проведены в соответствии с рекомендациями (Почвенно-географическая база данных России. Электронный ресурс: <https://soil-db.ru/studentam-i-shkolnikam/muzei/muzei-pochvovedeniya-im-sa-zaharova/pochvennyu-razrez>). Из каждого горизонта отбирали по два образца, анализы проводили в трехкратной повторности.

В почвенных образцах определили:

- карбонаты по Шейблеру, % (Агрохимические методы ..., 1975);
- массовую долю органического вещества (гумус), % (ГОСТ 26213-2021, п. 1);
- обменный натрий, ммоль/100 г (ГОСТ 26950-86);
- содержание обменных форм кальция и магния, ммоль/100 г (ГОСТ 26487-85, п. 2);
- содержание сульфатов гипса, % (по методу Айдиняна: Методические указания ..., 1977).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для получения достоверных данных об изменениях свойств почв под влиянием культуры риса в 2002 году был заложен разрез на рисовом севообороте; для сравнения в непосредственной близости (200 м на северо-восток от разреза № 1) был заложен контрольный разрез на залежи. Через два года после проведенных исследований участок был выведен из состава рисового севооборота и на нем стали возделываться полевые культуры. В 2023 году были заложены разрезы в непосредственной близости от мест заложения разрезов в 2002 году. Из морфологических описаний следует, что если в 2002 году белоглазка в почве под рисом залегала начиная со 117 см, то в 2023 году горизонт скопления белоглазки залегал на глубине 38–65 см, отдельные крупные мучнистые скопления карбонатов отмечены и на глубине 100–110 см. Со 100 см до 110 см вместе с мучнистыми скоплениями карбонатов появляется гипс в виде крупных друз, а в слое 110–130 см отмечено наличие мелких игольчатых кристаллов гипса.

В темно-каштановой почве залежного участка в 2002 году белоглазка появлялась с 54 см, гипс в разрезе мощностью 145 см вскрыт не был. В 2023 году по всему профилю отмечено наличие очень мелких кристаллов гипса.

Динамика солей в темно-каштановых почвах рисового севооборота и залежного участка.

Процессы динамики солей в орошаемых почвах, в том числе и темно-каштановых, хорошо изучены и описаны в трудах различных ученых (Панин, 1968; Попов, Дмитриюкова, 1975; Розанов и др., 1983; Айдаров, 1985; Минашина, 1986; Новикова, 2004; Байшекеев, Рау, 2017). Основным выводом их исследований является то, что орошение в автоморфных условиях приводит к рассолению почвенно-грунтовой толщи. Независимо от минерализации оросительных вод, в гидроморфных условиях при расположении уровня грунтовых вод выше 3–5 м от поверхности, происходит интенсивный вынос легкорастворимых солей из зоны аэрации.

Наши исследования, проведенные на темно-каштановых почвах Пролетарской ОС в 2002 году, подтвердили это положение (Кушнарера, Омелянчук, 2024). Содержание легкорастворимых солей в почвенном профиле вниз по профилю возрастало от 0,082 до 0,126%, достигая максимума в горизонте С (рис. 1А). В составе солей преобладали гидрокарбонаты кальция. В целом, почву можно было оценить как незасоленную.

В почве залежи наблюдалось увеличение солей вниз по профилю от 0,090 до 0,622% (рис. 2А). Химизм засоления и его степень меняется от незасоленного нейтрального в верхнем полуметре почвы до сильнозасоленного содово-сульфатного в материнской породе. Такая ситуация нередко складывается на участках, прилегающих к орошаемым полям, за счет близкого залегания минерализованных грунтовых вод и формирования десуктивно-выпотного типа водного режима, в то время как на полях орошения засоление отсутствует благодаря ирригационно-промывному типу водного режима (Дюшофур, 1970; Кушнарера, Омелянчук, 2024).

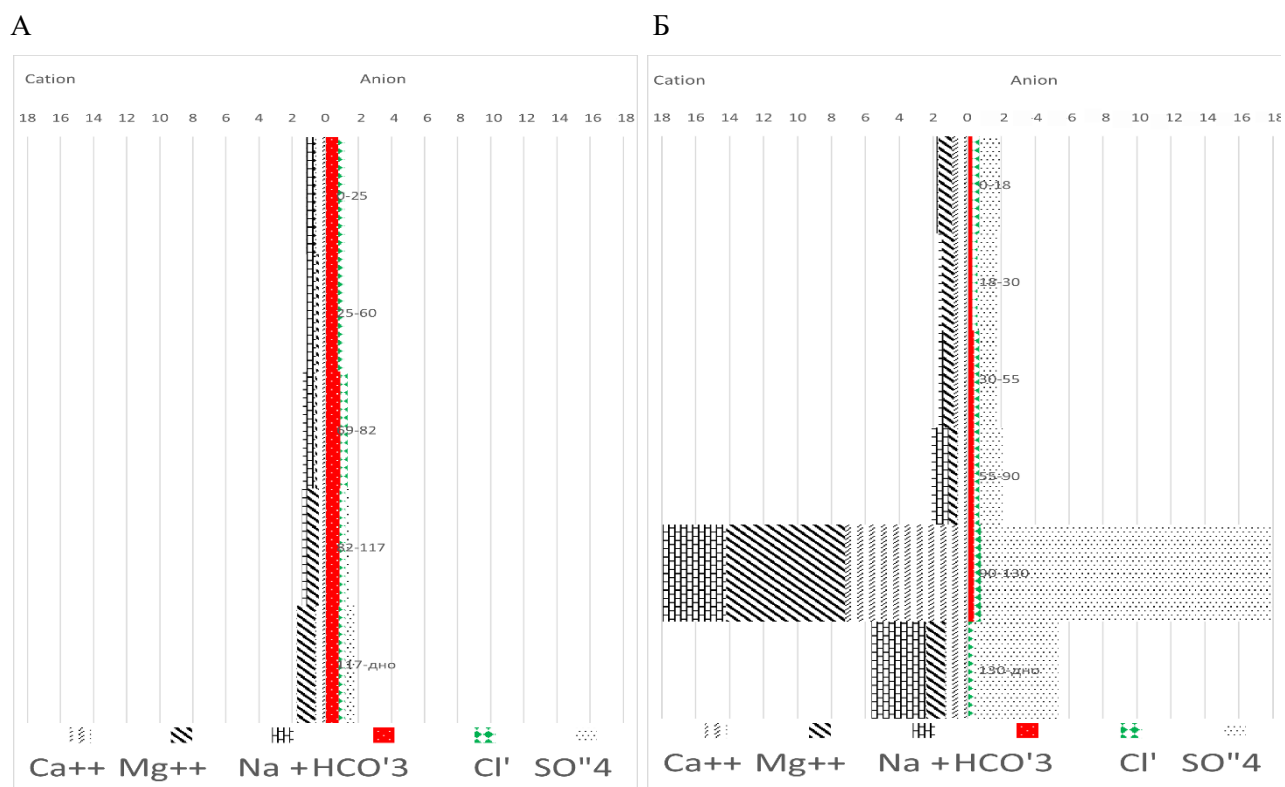


Рисунок 1. Солевые профили темно-каштановой почвы рисового севооборота в 2002 (А) и 2023 (Б) годах.

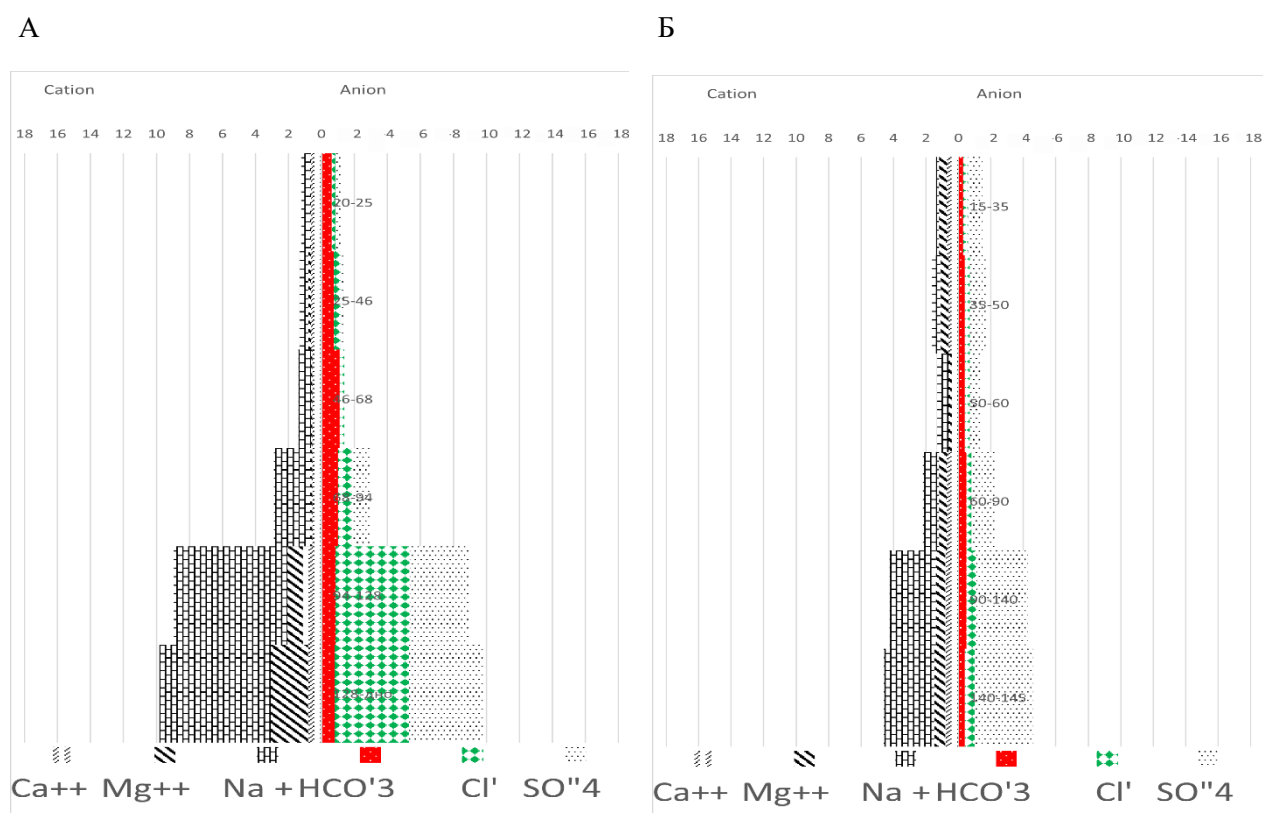


Рисунок 2. Солевые профили темно-каштановой почвы залежного участка в 2002 (А) и 2023 (Б) годах.

В состав почвенно-поглощающего комплекса в почвах сухостепной зоны входят Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ . Основным является обменный катион Ca^{2+} , что обусловлено наличием в почвах каштанового типа и породах, на которых они формируются, большого количества кальция в первичных кальцийсодержащих минералах. Важную роль играет и тот факт, что Ca^{2+} характеризуется более высокой энергией внедрения, чем магний и натрий, легче сорбируется глинистыми минералами и, особенно, гумусовыми веществами (Ковда, 1973).

Данные о содержании обменных катионов в темно-каштановых почвах в 2023 году в постмелиоративный период приведены в таблице 1. Они свидетельствуют, что в темно-каштановой почве залежного участка (разрез 2302) содержание Ca^{2+} уменьшается от 31,2 ммоль-экв/100 г в поверхностном (0–15 см) горизонте до 24,8 ммоль-экв/100 г в почвообразующей породе. Количество эквивалентов кальция вниз по профилю залежной почвы постепенно снижается. Вероятно, это обусловлено снижением количества гумуса с глубиной, так как гуматы Ca играют важную роль в связывании кальция.

Наоборот, в темно-каштановой почве бывшего рисового севооборота (разрез 2301) наблюдается более низкое содержание обменного кальция в верхней толще – 28,0–23,2 ммоль-экв /100 г и более высокая обеспеченность этим катионом нижней части почвенной толщи – 39,2–37,6 ммоль-экв/100 г. Такие различия в профильном распределении обменного кальция в этих почвах обусловлены соответствующей разницей содержания карбоната кальция в профиле этих почв. Максимальное скопление этого минерала в почве бывшего рисового поля сосредоточено на глубине 60–145 см, а наибольшее количество обменного кальция обнаружено на глубине 90–130 см.

Таблица 1

Состав поглощенных катионов темно-каштановой почвы рисового севооборота и залежи в постмелиоративный период

Гори- зонт	Глубина отбора, см	Натрий		Кальций		Магний	
		ммоль/100 г	%	ммоль/100 г	%	ммоль/100 г	%
Темно-каштановая почва, рисовый севооборот, 2023 г. Разрез 2301							
A _{пах}	0–18	0,1	0,3	28,0	79,3	7,2	20,4
A _{подпах}	18–30	0,2	0,5	29,6	80,0	7,2	19,5
B	30–55	0,5	1,6	24,0	77,7	6,4	20,7
C _{ca}	55–90	1,6	5,3	23,2	76,3	5,6	18,4
C ₂	90–130	0,9	1,8	39,2	78,9	9,6	19,3
C ₃	130–дно	1,9	3,9	37,6	77,8	8,8	18,2
Темно-каштановая почва, залежь, 2023 г. Разрез 2302							
A _д	0–15	0,1	0,3	31,2	81,0	7,2	18,7
A	15–35	0,2	0,6	26,4	80,0	6,4	19,4
B ₁	35–50	1,0	2,9	27,2	78,6	6,4	18,5
BC	50–60	1,6	4,8	25,6	76,2	6,4	19,0
C _{ca}	60–90	2,4	7,0	25,6	74,4	6,4	18,6
C1	90–140	3,3	9,8	24,0	71,2	6,4	19,0
C ₂	140–дно	2,9	8,5	24,8	72,7	6,4	18,8

Количество обменного катиона Mg^{2+} в ППК исследуемых почв подвержено колебаниям. В залежной почве (разрез 2302) его содержание в верхнем гумусном горизонте (0–15 см) составляет 7,2 ммоль-экв/100 г, а далее вниз по профилю остается одинаковым, составляя 6,4 ммоль-экв/100 г. В почве бывшего рисового севооборота (разрез 2301) содержание обменного катиона Mg^{2+} в верхних гумусных горизонтах было таким же, как и в залежной почве. В средней части профиля до C₁ содержание обменного магния снизилось до 5,6 ммоль-экв/100 г, а в горизонте C₂ на глубине 90–130 см достигло максимальной величины – 9,6 ммоль-экв/100 г.

ОБСУЖДЕНИЕ

Окарбоначивание в темно-каштановых почвах постмелиоративного периода. В почвах, формирующихся в условиях сухой степи и на карбонатных породах, карбонаты концентрируются в средней части профиля, образуя карбонатно-иллювиальный горизонт. При этом глубина залегания этого

горизонта определяется преимущественно количеством осадков, обуславливающих глубину промачивания почвенной толщи (Худякова, 2014; Минаева и др., 2021). При наличии в почвенном растворе уголекислоты происходит переход труднорастворимых карбонатных соединений в гидрокарбонатную формы и их миграция на глубину промачивания. Причем в наиболее влажные годы карбонаты опускаются на большую глубину, маркируя нижнюю границу карбонатно-иллювиального горизонта. В более сухие годы глубина промачивания меньше, соответственно и миграция карбонатов осуществляется на меньшую глубину, обозначая, тем самым, верхнюю границу горизонта белоглазки, образующейся при высыхании почвы и сегрегации карбонатов в новообразования. Однако в сухостепных почвах картина осложняется жарким климатом и высокой интенсивностью восходящих потоков влаги, в силу чего средние многолетние глубины промачивания почвы атмосферными осадками находятся глубже горизонта аккумуляции белоглазки (Минаева и др., 2021).

Использование темно-каштановых почв под орошение приводит к развитию процессов выщелачивания, в том числе и такой относительно труднорастворимой соли как карбонат кальция (Худякова, 2014).

Изменение условий в постмелиоративный период может привести к постепенной десегрегации карбонатных новообразований; как следствие, они теряют округлую форму, их очертания расплываются, а граница становится диффузной. Одновременно наблюдается подтягивание карбонатов вверх и их накопление в пахотном горизонте. Процесс этот получил название окарбонирования. Изменение водно-воздушного режима, смена ирригационно-промывного типа водного режима после прекращения орошения на выпотной либо дессузивно-выпотной сопровождаются изменением процессов выщелачивания и миграции карбонатов. Это и наблюдается в исследуемом ландшафте.

Об изменении содержания карбонатов, сульфатов гипса и pH водной вытяжки в профиле исследуемых темно-каштановых почв за 20 лет, минувших после вывода почвы из рисового севооборота, свидетельствуют данные, приведенные в таблице 2.

Таблица 2

Химический состав темно-каштановой почвы рисового севооборота и залежи

Горизонт	Глубина отбора, см	pH _{вод.} , ед.	CaCO ₃ , %	Гумус, %	CaSO ₄	
		M±m*			%	Коэффициент загипсования
Темно-каштановая почва, рисовый севооборот, 2023 г. Разрез 2301						
А пах	0–18	8,3±0,1	6,19±0,10	2,24±0,44	0,58	0,88
А подпах	18–30	8,6±0,1	7,22±0,12	1,83±0,36	0,54	0,82
Вк	30–55	8,8±0,1	18,14±0,29	0,94±0,18	0,65	0,98
BC	55–90	9,1±0,1	10,93±0,17	0,51±0,10	0,45	0,68
C _{ca}	90–130	8,3±0,1	5,77±0,09	0,44±0,09	0,91	1,38
C	130–дно	8,5±0,1	6,39±0,10	0,26±0,05	0,66	1,00
Темно-каштановая почва, залежь, 2023 г. Разрез 2302						
A _д	0–15	8,3±0,1	3,09±0,05	3,65±0,54	0,53	0,87
A	15–35	8,5±0,1	1,24±0,02	2,67±0,53	0,66	1,08
B	35–50	9,0±0,1	9,90±0,16	1,52±0,30	0,62	1,02
BC	50–60	9,0±0,1	5,77±0,09	1,35±0,27	0,55	0,90
C _{ca}	60–90	9,2±0,1	11,55±0,18	1,31±0,26	0,51	0,84
C1	90–140	9,0±0,1	9,48±0,16	0,99±0,19	0,41	0,67
C2	140–дно	9,4±0,1	16,49±0,26	0,81±0,16	0,61	1,00

Примечание.

*M – среднее арифметическое (n=6); m – ошибка средней.

Согласно данным за 2002 год, после длительного орошения в морфологии исследуемых почв произошли изменения: белоглазка залегала глубоко, не было кристаллов гипса, в верхних горизонтах комковато-ореховатая структура сменялась на столбчато-слоистую, наблюдалось более интенсивное вскипание от HCl.

В залежных темно-каштановых почвах 2023 года формирование карбонатного профиля наблюдается в верхнем гумусовом горизонте. Количество карбонатов резко возрастает в горизонте В (9,90%) и достигает максимума в горизонте С2 (16,49%). Фактически весь почвенный профиль формируется при активном участии карбонатов. Максимальное содержание карбонатов (16,49%) отмечается в нижнем горизонте почвообразующей толщи 140–145 см. На преимущественное накопление карбонатов в нижней части профиля орошаемой темно-каштановой почвы после 10-летнего ее пребывания в залежном состоянии указывает и В.М. Худякова (2014).

Иная картина в формировании карбонатного профиля наблюдается в темно-каштановой почве рисового севооборота в постмелиоративный период. В верхнем гумусовом горизонте накапливается достаточно много карбонатов, но максимальная их концентрация отмечается на глубине 30–55 см (18,14%), что является следствием десуктивно-выпотного типа водного режима. Отсутствие орошения почв и достаточно близкий к поверхности уровень залегания карбонатно-сульфатных грунтовых вод (2,8–2,9 м) способствовали существенному увеличению содержания карбонатов в почвенном профиле и прекращению процессов выщелачивания из верхнего метрового слоя.

Таким образом, с учетом всего вышеизложенного можно утверждать, что в темно-каштановых почвах рисового севооборота и прилегающей к нему залежи происходит окарбоначивание почвенного профиля. Это доказывается как значительным увеличением содержания карбонатов по всему почвенному профилю, так и наличием в почвенном профиле горизонта со скоплениями крупных карбонатных сгустков.

Загипсование в темно-каштановых почвах, выведенных из рисового севооборота.

Гипсоносными называются почвы, в профиле которых «до глубины 2 м присутствует горизонт мощностью >10 см с содержанием гипса $\geq 10\%$ » (Минашина, 1958). Разделение гипсоносных почв производят по содержанию гипса в горизонте его максимального скопления: 1–10% – слабогипсоносные, 10–20% – среднегипсоносные, 20–40% – сильногипсоносные, >40% – очень сильногипсоносные (Ямнова, Панкова, 2013).

Есть и другая точка зрения, согласно которой гипсовым называется горизонт, в котором накопленный гипс превышает его содержание в материнской породе или нижележащем горизонте (Dregne, 1976).

В исследуемой ситуации гипс в почве постмелиоративного периода рисового севооборота появился в виде крупных друз на глубине 90–130 см, что уже свидетельствует о процессе загипсования. Для более полного понимания ситуации был рассчитан коэффициент загипсования – отношение содержания гипса в мелкозем в генетическом горизонте к его содержанию в породе. Этот коэффициент показал (табл. 2), что на глубине 90–130 см в темно-каштановой почве рисовника идет довольно сильное загипсование, что подтвердило результаты морфологического исследования при описании разреза.

В почве на залежном участке также наблюдается, хотя и более слабое, загипсование. Это обусловлено сульфатным составом близко залегающих к поверхности грунтовых вод. Следует отметить, что появление мучнистых форм гипса в почвах солонцового комплекса Прикаркинской низменности, выведенной из рисового севооборота, отмечали также Н.Б. Хитров и Л.В. Роговнева (2021).

Осолонцевание в темно-каштановых почвах постмелиоративного периода. Наличие в составе обменных катионов натрия в темно-каштановых почвах является одним из диагностических признаков этих почв. И.П. Герасимов и М.А. Глазовская (1960) высказали предположение, что внедрение Na^+ в почвенно-поглощающий комплекс может происходить за счет поглощения его солей некоторыми растениями сухой степи из глубоких, богатых легкорастворимыми солями горизонтов, в результате чего они накапливают в своей вегетативной массе относительно много натрия. При минерализации растительных остатков таких растений натрий попадает в почвенный раствор, а из него поглощается органическими и минеральными коллоидами. Высвобождается натрий и при выветривании первичных минералов. При достижении очень высокой концентрации Na^+ в растворе он, несмотря на более низкую энергию внедрения, получает возможность внедряться в почвенно-поглощающий комплекс.

Из данных, представленных в таблице 1, следует, что содержание обменного натрия в залежной почве (разрез 2302) в самых верхних гумусовых горизонтах низкое. Оно колеблется в пределах 0,1–0,2 ммоль-экв/100 г, что составляет не более 1% от суммы ППК. В более глубоких горизонтах количество Na^+ возрастает. Так, в горизонтах В1 и ВС его содержание изменяется от 1,0 до 1,6 ммоль-экв/100 г. Наибольшая аккумуляция обменного катиона Na приурочена к горизонту С1 90–140 см – 3,3 ммоль-

экв/100 г. В этих горизонтах сформировалась щелочная реакция именно благодаря наличию Na^+ в количествах, соответствующих средней степени солонцеватости. Внедрение катиона Na^+ в ППК происходит в результате его концентрирования и взаимодействия почвы с раствором Na_2CO_3 .

Содержание обменного катиона Na^+ в почве бывшего рисового севооборота (разрез 2301) в самых верхних гумусовых горизонтах и в горизонте В тоже низкое, хотя и несколько выше, чем в почве залежи: 0,1–0,5 ммоль-экв/100 г. В более глубоких нижележащих горизонтах его количество возрастает, достигая в горизонте С_к максимального значения 1,6–1,9 ммоль-экв/100 г., соответствующего слабой степени солонцеватости.

По итогу можно сказать, что начиная с горизонта С₁ и в почве бывшего рисового севооборота, и в почве залежи наблюдается внедрение в ППК иона натрия и проявление солонцового процесса, в результате в почве образуются гидрофильные системы с большими возможностями к уплотнению и с меньшим содержанием фильтрующих пор.

Засоление в темно-каштановых почвах постмелиоративного периода. Сопоставление данных ионного состава водных вытяжек показало, что от 2002 к 2023 году прослеживается определенная тенденция перераспределения легкорастворимых солей в почве (Кушнарева, Омелянчук, 2024). К 2023 году ситуация изменилась: общее количество легкорастворимых солей по всему профилю возрастает в почве рисового севооборота (рис. 1Б), достигая максимума 1,19% в слое 90–130 см, и, наоборот, снижается до 0,32% в профиле залежной почвы (рис. 2Б). Учитывая, что в слое 90–130 см при полевом исследовании обнаружены скопления карбонатов и гипса, можно предположить, что такая большая величина сухого остатка обусловлена наличием именно этих солей – карбонатов и сульфатов кальция, являющихся нетоксичными. Однако данные состава водной вытяжки указывают на преимущественное накопление сульфатов, причем суммарно количество вредных солей – сульфатов магния и натрия превышает содержание сульфата кальция. Это позволяет классифицировать темно-каштановую почву бывшего рисового севооборота как глубокосолончаковатую; степень засоления – сильная, химизм засоления – сульфатный. Что касается почвы залежного участка, то здесь, напротив, наблюдается рассоление; тем не менее, почва остается слабозасоленной глубокосолончаковатой.

ВЫВОДЫ

1. В темно-каштановых почвах рисового севооборота и прилегающей к нему залежи после выведения части чеков из его состава и использования в течение 20 лет под полевые культуры наблюдается существенная трансформация водно-солевого состава и окарбоначивание. Изменение водного режима с ирригационно-промывным на десуктивно-выпотной привело к формированию на глубине 90–130 см слоя, обогащенного сульфатами магния и натрия, а также гипсом. Окарбоначивание почвенного профиля доказывается как значительным увеличением содержания карбонатов по всему почвенному профилю, так и наличием в почвенном профиле горизонта со скоплениями крупных карбонатных суглинков.

2. В постмелиоративный период в почве рисового севооборота гипс появился в виде крупных друз на глубине 90–130 см, что свидетельствует о проявлении процесса загипсования. Коэффициент загипсования показал, что на глубине 90–130 см в темно-каштановой почве рисовника этот процесс идет довольно сильно; это подтвердило результаты морфологического исследования при описании разреза. В почве на прилегающем залежном участке также наблюдается, хотя и более слабое, загипсование, что обусловлено сульфатным составом близко залегающих к поверхности грунтовых вод.

3. В горизонте С₁ и в почве бывшего рисового севооборота, и в почве залежи происходит внедрение в ППК иона натрия и проявление солонцового процесса; в результате образуются гидрофильные системы с большими возможностями к уплотнению и с меньшим содержанием фильтрующих пор. На этой же глубине накапливаются и легкорастворимые соли, свидетельствуя о сильной степени засоления почвы бывшего рисового севооборота и слабой – почвы залежного участка.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания в сфере научной деятельности № FENW-2023-0008.

ЛИТЕРАТУРА

Агроклиматические ресурсы Ростовской области. Ленинград: Гидрометеиздат, 1972. 250 с.

Агрохимические методы исследования почв. 1975. Москва: Наука. С. 25–26.

Айдаров И.П. Регулирование водно-солевого и питательного режимов орошаемых земель. Москва: Агропромиздат, 1985. 304 с.

Байшекеев А.Д., Рау А.Г. Водно-солевой баланс рисовых полей с использованием дренажно-сбросных вод для полива риса // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2017. № 6–2. С. 281–284. <https://doi.org/10.17513/mjpf.111669>

Безуглова О.С., Ильинская И.Н., Закруткин В.Е., Назаренко О.Г., Литвинов Ю.А., Гаевая Э.А., Меженков А.А., Жумбей А.И. Динамика деградации земель в Ростовской области // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2022. Том 86. № 1. С. 41–54. <https://doi.org/10.31857/S2587556622010034>

Безуглова О.С., Кушнарера А.В., Омелянчук А.А., Тищенко С.А. Гумусное состояние темно-каштановых почв, выведенных из рисового севооборота // АгроЭкоИнфо. 2024. № 6(66). <https://doi.org/10.51419/202146646>

Герасимов И.П., Глазовская М.А. Основы почвоведения и география почв. Москва: Географгиз, 1960. 490 с.

ГОСТ 26487-85. Почвы. Определение обменного кальция и обменного (подвижного) магния методами ЦИНАО. Москва: Государственный комитет СССР по стандартам, 1985. С. 21–33.

ГОСТ 26950-86. Почвы. Метод определения обменного натрия. Москва: Государственный комитет СССР по стандартам, 1986. 8 с.

ГОСТ 26213-2021. Почвы. Методы определения органического вещества. Москва: Российский институт стандартизации, 2021. 8 с.

Гуторова О.А. Современное состояние плодородия почв рисовых агроландшафтов Кубани и тренд его изменения в процессе сельскохозяйственного использования. Диссертация ... д-р с.-х. наук. Краснодар, 2020. 509 с.

Дюшофур Ф. Основы почвоведения. Эволюция почв (Опыт изучения динамики почвообразования) / Пер. М.И. Герасимовой; Предисл. и ред. И.П. Герасимова. Москва: Прогресс, 1970. 591 с.

Ильина Л.П., Сушко К.С. Современные проблемы деградации сухостепных почв долины Маныч // Биосфера. 2019. Том 11. № 3. С. 120–127. <https://doi.org/10.24855/biosfera.v11i3.508121>

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

Ковда В.А. Основы учения о почвах. Общая теория почвообразовательного процесса. Книга вторая. Москва: Наука, 1973. 474 с.

Кушнарера А.В., Безуглова О.С. Влияние орошения на свойства почв. Обзор // Живые и биокосные системы. 2023. № 46. <https://doi.org/10.18522/2308-9709-2023-46-4>

Кушнарера А.В., Безуглова О.С. Изменение гумусного состояния темно-каштановой почвы рисового севооборота в постмелиоративный период // Проблемы и перспективы устойчивого развития почвенного покрова горных и равнинных территорий: Сборник материалов Международной конференции (Геленджик, 04–06 июня 2024 г.). Геленджик: Южный федеральный университет, 2024. С. 127.

Кушнарера А.В., Омелянчук А.А. Изменение водно-солевого состава темно-каштановой почвы рисового севооборота в постмелиоративный период // Актуальные вопросы развития отраслей сельского хозяйства: теория и практика: Материалы VI Всероссийской конференции молодых ученых АПК (Рассвет, 23–24 мая 2024 г.). Рассвет: ООО «АзовПринт», 2024. С. 24–29. <https://doi.org/10.69535/FRARC.2024.83.66.005>

Методические указания по проведению анализов почв в зональных агрохимических лабораториях. Москва: ЦИНАО, 1977. С. 75–79.

Минаева Е.Н., Безуглова О.С., Морозов И. В. Влияние многолетней динамики атмосферных осадков на генезис степных и сухостепных почв // Наука Юга России. 2021. Том 17. № 1. С. 52–62. <https://doi.org/10.7868/S25000640210105>

Минашина Н.Г. Серо-коричневые гажевые (гипсоносные) почвы Кировабадского массива Азербайджанской ССР // Труды Почвенного института. 1958. Том LIV. С. 151–254.

Минашина Н.Г. Развитие орошения и его влияние на почвы от энеолита до наших дней // Успехи почвоведения. Москва: Наука, 1986. С. 232–238.

Новикова А.В. Засоленные почвы, их распространение в мире, окультурирование и вопросы экологии. Харьков, 2004. 119 с.

- Осипов А.В. Изменение свойств и солевого режима почв современной дельты реки Кубани / Под общ. ред. В.Н. Слюсарева. Краснодар: КубГАУ, 2016. 131 с.
- Панин П.С. Процессы солеотдачи в промываемых толщах почв / Отв. ред. Р.В. Ковалев. Новосибирск: Наука. Сибирское отделение, 1968. 303 с.
- Пономаренко Т.С., Бреева А.В. Анализ современного состояния рисоводческой отрасли в Ростовской области // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. 2016. № 1(61). С. 23–28.
- Попов А.А., Дмитриюкова Н.А. Динамика щелочности в почвах солонцового комплекса при рисосеянии // Повышение продуктивности солонцовых земель на Северном Кавказе. Ростов-на-Дону: Изд-во Ростовского университета, 1975. С. 67–68.
- Попов В.В. Состояние плодородия пахотных земель в юго-восточных районах Ростовской области // Достижения науки и техники АПК. 2018. Том 32. № 3. С. 7–11. <https://doi.org/10.24411/0235-2451-2018-10302>
- Розанов Б.Г., Андреев Г.И., Буйлов В.В., Моргун Е.Г., Николаева С.А., Пачепский Я.А. Эволюция черноземов при орошении // Русский чернозем. 100 лет после Докучаева. Москва: Наука, 1983. С. 241–252.
- Сенчуков Г.А., Пономаренко Т.С. Моделирование процессов водораспределения на Пролетарской оросительной системе // Мелиорация и гидротехника. 2022. Том 12. № 1. С. 141–156. <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2022-12-1-141-156>
- Хитров Н.Б., Роговнева Л.В. Пятилетнее изменение засоленности почв и грунтов рисовых систем Прикаркинитской низменности после прекращения орошения // Почвоведение. 2021. № 1. С. 120–135. <https://doi.org/10.31857/S0032180X21010044>
- Хитров Н.Б., Роговнева Л.В., Паштецкий В.С. Изменение засоленности почв и грунтовых вод рисовых систем Присивашской низменности после прекращения орошения // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2020. Вып. 102. С. 70–102. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-102-70-102>
- Хитров Н.Б., Горохова И.Н., Кравченко Е.И. Солевое состояние почв в постирригационных условиях на Генераловской оросительной системе в Волгоградской области // Почвоведение. 2022. № 8. С. 1056–1070. <https://doi.org/10.31857/S0032180X2208007X>
- Худякова В.М. Гранулометрический состав, физико-химические и агрохимические свойства темно-каштановых почв разного хозяйственного использования в условиях Западного Казахстана. Диссертация ... канд. сельскохозяйственных наук. Санкт-Петербург–Пушкин, 2014. 363 с.
- Чибилев А.А. Степная Евразия: региональный обзор природного разнообразия. Изд. 2-е, перераб. и доп. Москва–Оренбург: Институт степи РАН; РГО, 2017. 324 с.
- Ямнова И.А., Панкова Е.И. Гипсовые новообразования и формирующие их элементарные почвообразовательные процессы // Почвоведение. 2013. № 12. С. 1423–1436. <https://doi.org/10.7868/S0032180X13120125>
- Dregne H.E. Soils of arid regions. Amsterdam. 1976. 237 p.
- Du X., Hu H., Wang T., Zou L., Zhou W., Gao H., Ren X., Wang J., Hu S. Long-term rice cultivation increases contributions of plant and microbial-derived carbon to soil organic carbon in saline-sodic soils // Science of The Total Environment. 2023. Vol. 904. P. 166713. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166713>
- 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.
- Liu B., Guo C., Xu J., Zhao Q., Chadwick D., Gao X., Zhou F., Lakshmanan P., Wang X., Guan X., Zhao H., Fang L., Li S., Bai Z., Ma L., Chen X., Cui Z., Shi X., Zhang F., Chen X., Li Z. Co-benefits for net carbon emissions and rice yields through improved management of organic nitrogen and water // Nature Food. 2024. Vol. 5. P. 241–250. <https://doi.org/10.1038/s43016-024-00940-z>
- Liu J., Wang N., Wang H., Zhao C., Huang N., Zhao X. Evaluation on the migrating quantity of fluorine among water-soil-rice system in soda saline-alkali soil as paddy field is developed // Journal of Agriculture and Food Research. 2025. Vol. 23. P. 102264. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2025.102264>
- Nascimento G., Catala-Fornier M., Villegas D., Ferre O., Tomàs N., Cantero-Martínez C. Enhancing soil organic carbon and structure in Mediterranean rice systems through cover cropping // Soil and Tillage Research. 2026. Vol. 255. P. 106777. <https://doi.org/10.1016/j.still.2025.106777>
- Nazarenko O. Regional climate change in the south of Rostov region: A case of arid steppe // E3S Web of Conferences. 2023. Vol. 407. P. 02006. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202340702006>

Wen S., Cui N., Wang Y., Gong D., Wang Z., Xing L., Wu Z., Zhang Y. Effect of biochar application on yield, soil carbon pools and greenhouse gas emission in rice fields: A global meta-analysis // *Agricultural and Forest Meteorology*. 2025. Vol. 369. P. 110571. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2025.110571>

Zhidkova A.Y., Zarubina R.V., Panova V.A., Saenko N.M. The issue of the change of the climatic conditions of the Rostov region of the Russian Federation // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020. Vol. 548. Biodiversity and Ecosystem Stability. P. 072052. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/548/7/072052>

Поступила в редакцию 11.08.2025

Принята 01.09.2025

Опубликована 11.09.2025

Сведения об авторах:

Безуглова Ольга Степановна – доктор биологических наук, профессор, профессор кафедры почвоведения и оценки земельных ресурсов ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет» (г. Ростов-на-Дону, Россия); lola314@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4180-4008>

Кушнарeva Алла Владимировна – заместитель министра, Министерство природных ресурсов и экологии Ростовской области (г. Ростов-на-Дону, Россия); avknadzor@list.ru; <https://orcid.org/0009-0007-0363-3996>

Горбов Сергей Николаевич – доктор биологических наук, доцент, профессор кафедры ботаники ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет» (г. Ростов-на-Дону, Россия); gorbow@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0174-1631>

Омелянчук Алина Алексеевна – ведущий специалист, Министерство природных ресурсов и экологии Ростовской области (г. Ростов-на-Дону, Россия); alinka-kush@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0001-8524-7736>

Тагивердиев Сулейман Самидинович – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории биогеохимии ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет» (г. Ростов-на-Дону, Россия); ticoo@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4422-1094>

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 post-amelioration status of the dark-chestnut soil in rice crop rotation

© 2025 O. S. Bezuglova ¹, A. V. Kushnareva ², S. N. Gorbov ¹, A. A. Omelyanchuk ²,
S. S. Tagiverdiev ¹

¹Southern Federal University, Stachki Ave. 194/1, Rostov-on-Don, Russia. E-mail: lola314@mail.ru

²Ministry of Natural Resources and Environment of the Rostov Region, 40th Anniversary of Victory Ave., 1a, Rostov-on-Don, Russia. E-mail: avknadzor@list.ru

The aim of the study. To identify changes in the condition and properties of the dark chestnut soil in the area of the Proletarskaya irrigation system after the rice irrigation was ceased in 2003.

Location and time of the study. Rostov region, Proletarskaya irrigation system. The studies were conducted in 2002 and in 2023–2024.

Methods. Morphometric examination of soil profiles, i.e. thickness measurement and genetic horizons description, were performed in the field. The following soil properties were determined in the collected soil samples: pH of aqueous suspension, carbonates and organic matter content, exchangeable sodium, calcium and magnesium content, as well as the content of gypsum sulfates.

Results. Changes in the morphology and chemical composition of dark chestnut soil on which rice crop rotation was ceased in 2003 were revealed. Since then, the soil was used for cultivating field crops without irrigation. The change in the water regime from irrigation-leaching to desiccation-exudative led to the formation of a soil layer enriched in magnesium and sodium sulfates, as well as gypsum, in the lower part of the profile. Carbonation of the soil profile was proven by both a significant increase in the carbonate content throughout the profile and the presence of a horizon with clusters of large carbonate clots. Gypsum appeared in the form of large druse at the depth of 90–130 cm, whereas in the soil of the fallow area, small gypsum crystals were visible throughout the profile, indicating the gypsum formation process caused by the increased sulfate content of the groundwater lying

close to the surface. In the lower part of the dark chestnut soil profiles in both areas, weak solonetzization was diagnosed, and in the soil of the former rice crop rotation there was a high degree of sulfate salinity.

Conclusion. The change from the irrigation-leaching type of water regime to the desiccation-exudative type under the semi-arid climate, provided that the groundwater of hydrocarbonate-sulphate composition is close to the surface, is accompanied by carbonation, gypsum formation, weak solonetzization and deep salinization of the soil profile of dark chestnut soils.

Keywords: Rostov region; Proletarskaya irrigation system; dark chestnut soil; post-ameliorative status; carbonation; gypsum formation; solonetzization.

How to cite: Bezuglova O.S., Kushnareva A.V., Gorbov S.N., Omelyanchuk A.A., Tagiverdiev S.S. The post-amelioration status of dark-chestnut soil in rice crop rotation. The Journal of Soils and Environment. 2025. Vol. 8. No. 3. e328. DOI: [10.31251/pos.v8i3.328](https://doi.org/10.31251/pos.v8i3.328)

FUNDING

The study was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project No. FENW-2023-0008).

REFERENCES

- Agroclimatic resources of the Rostov region. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1972. 250 p. (in Russian).
- Agrochemical methods of soil research. 1975. Moscow: Nauka Publ, P. 25–26. (in Russian).
- Aidarov I.P. Regulation of water-salt and nutrient regimes of irrigated lands. Moscow: Agropromizdat, 1985. 304 p. (in Russian).
- Baishekeev A.D., Rau A.G. Water-salt balance of paddy fields with using drainage water for irrigation rice. International Journal of Applied and Fundamental Research. 2017. No. 6–2. P. 281–284. (in Russian). <https://doi.org/10.17513/mjpf.111669>
- Bezuglova O.S., Ilyinskaya I.N., Zakrutkin V.E., Nazarenko O.G., Litvinov Yu.A., Gayevaya E.A., Mezhenkov A.A., Zhumbey A.I. Dynamics of land degradation in Rostov oblast. Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Seriya geograficheskaya. 2022. Vol. 86. No. 1. P. 41–54. (in Russian). <https://doi.org/10.31857/S2587556622010034>
- Bezuglova O.S., Kushnareva A.V., Omelanchuk A.A., Tishchenko S.A. Humus state of dark chestnut soils derived from rice crop rotation. AgroEcoInfo. 2024. No. 6(66). (in Russian). <https://doi.org/10.51419/202146646>
- Gerasimov I.P., Glazovskaya M.A. Fundamentals of soil science and soil geography. Moscow: Geografiz, 1960. 490 p. (in Russian).
- GOST 26487-85. Soils. Determination of exchangeable calcium and exchangeable (mobile) magnesium by the methods of the Central Institute of Agronomy and Soil Science. Moscow: USSR State Standards Committee, 1985. P. 21–33. (in Russian).
- GOST 26950-86. Soils. Method for determination of exchangeable sodium. Moscow: USSR State Standards Committee, 1986. 8 p. (in Russian).
- GOST 26213-2021. Soils. Methods for determination of organic matter. Moscow: Russian Institute of Standardization, 2021. 8 p. (in Russian).
- Gutorova O.A. Current state of soil fertility in rice agrolandscapes of Kuban and the trend of its change in the process of agricultural use. Dissertation ... Doctor of Agricultural Sci. Krasnodar, 2020. 509 p. (in Russian).
- Duchofour F. Fundamentals of Soil Science. Soil Evolution (Experience in studying the dynamics of soil formation) / Translated by M.I. Gerasimova; Preface and ed. by I.P. Gerasimov. Moscow: Progress, 1970. 591 p. (in Russian).
- Ilyina L.P., Sushko K.S. Current problems of dry-steppe soil degradation in Manych valley. Biosfera. 2019. Vol. 11. No. 3. P. 120–127. (in Russian). <https://doi.org/10.24855/biosfera.v11i3.508121>
- 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. Frieve. 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).
- Kovda V.A. Fundamentals of the doctrine of soils. General theory of the soil-forming process. Book two. Moscow: Nauka Publ., 1973. 474 p. (in Russian).
- Kushnareva A.V., Bezuglova O.S. The influence of irrigation on soil properties. Review. Live and Bio-Abiotic Systems. 2023. No. 46. (in Russian). <https://doi.org/10.18522/2308-9709-2023-46-4>

- Kushnareva A.V., Bezuglova O.S. Changes in the humus state of dark chestnut soil in rice crop rotation during the post-meliorative period. In book: Problems and prospects for sustainable development of the soil cover of mountainous and lowland territories. Collection of materials from the International Conference (Gelendzhik, 4–6 June, 2024). Gelendzhik: Southern Federal University, 2024. P. 127. (in Russian).
- Kushnareva A.V., Omelyanchuk A.A. Changes in the water-salt composition of the dark chestnut soil of the rice crop rotation in the post-melioration period. In book: Current issues in the development of agricultural sectors: theory and practice. Proceedings of the VI All-Russian Conference of Young Scientists of the AIC (Rassvet, 23–24 May, 2024). Rassvet: AzovPrint LLC, 2024. P. 24–29. (in Russian). <https://doi.org/10.69535/FRARC.2024.83.66.005>
- Methodical instructions for conducting soil analyzing in zonal agrochemical laboratories. Moscow: TsINAO, 1977. P. 75–79. (in Russian).
- Minaeva E.N., Bezuglova O.S., Morozov I.V. Influence of long-term dynamics of atmospheric precipitation on the genesis of steppe and dry-steppe soils of Rostov region. Science in the South of Russia. 2021. Vol. 17. No. 1. P. 52–62. (in Russian). <https://doi.org/10.7868/S25000640210105>
- Minashina N.G. Gray-brown gypsum-bearing soils of the Kirovabad massif of the Azerbaijan SSR. Proceedings of the Soil Science Institute. 1958. Vol. LIV. P. 151–254. (in Russian).
- Minashina N.G. Development of irrigation and its influence on soils from the Eneolithic to the present day. In book: Advances in Soil Science. Moscow: Nauka Publ., 1986. P. 232–238. (in Russian).
- Novikova A.V. Saline soils, their distribution in the world, cultivation and environmental issues. Kharkov, 2004. 119 p. (in Russian).
- Osipov A.V. Changes in the properties and salt regime of soils of the modern Kuban River delta / Under the general editorship of V.N. Slyusarev. Krasnodar: KubSAU, 2016. 131 p. (in Russian).
- Panin P.S. Salt release processes in washed soil strata / R.V. Kovalev (ed.). Novosibirsk: Nauka Publ. Siberian Branch, 1968. 303 p. (in Russian).
- Ponomarenko T.S., Breeva A.V. Analysis of the current state of the rice industry in the Rostov region. Ways of Increasing the Efficiency of Irrigated Agriculture. 2016. No. 1(61). P. 23–28. (in Russian).
- Popov A.A., Dmitryukova N.A. Dynamics of alkalinity in solonetzic soils during rice sowing. In book: Increasing the productivity of solonetzic lands in the North Caucasus. Rostov-on-Don: Rostov University Press, 1975. P. 67–68. (in Russian).
- Popov V. V. State of fertility of arable land in the southeastern districts of Rostov region. Achievements of Science and Technology in Agro-Industrial Complex. 2018. Vol. 32. No. 3. P. 7–11. (in Russian). <https://doi.org/10.24411/0235-2451-2018-10302>
- Rozanov B.G., Andreev G.I., Builov V.V., Morgun E.G., Nikolaeva S.A., Pachepsky Ya.A. Evolution of chernozems under irrigation. In book: Russian chernozem. 100 years after Dokuchaev. Moscow: Nauka Publ., 1983. P. 241–252. (in Russian).
- Senchukov G.A., Ponomarenko T.S. Water distribution process modeling on the Proletarskaya irrigation system. Land Reclamation and Hydraulic Engineering. 2022. Vol. 12. No. 1. P. 141–156. (in Russian). <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2022-12-1-141-156>
- Khitrov N.B., Rogovneva L.V. Five-year-long change in the salinity of soils and sediments on rice fields of the Karkinit lowland after cessation of irrigation. Eurasian Soil Science. 2021. Vol. 54. № 1. C. 135–149. <https://doi.org/10.1134/S106422932101004X>
- Khitrov N. B., Rogovneva L. V., Pashtetskiy V. S. Changes of soil salinity and ground waters at the rice systems in Sivash lowland after irrigation cease. Dokuchaev Soil Bulletin. 2020. Issue 102. P. 70–102. (in Russian). <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-102-70-102>
- Khitrov N.B., Gorokhova I.N., Kravchenko E.I. Soil salinity status under post-irrigation conditions at the Generalovskaya irrigation system in the Volgograd region. Pochvovedenie. 2022. No. 8. P. 1056–1070. (in Russian). <https://doi.org/10.31857/S0032180X2208007X>
- Khudyakova V.M. Granulometric composition, physicochemical and agrochemical properties of dark chestnut soils of different economic use in the conditions of Western Kazakhstan. Dissertation ... Cand. of Agricultural Sciences. St. Petersburg–Pushkin, 2014. 363 p. (in Russian).
- Chibilev A.A. Steppe Eurasia: a regional review of natural diversity. 2nd ed., revised and enlarged. Moscow -Orenburg: Steppe Institute of the Russian Academy of Sciences; RGO, 2017. 324 p. (in Russian).

Yamnova I.A., Pankova E.I. Gypsic pedofeatures and elementary pedogenetic processes of their formation. Eurasian Soil Science. 2013. Vol. 46. No. 12. P. 1117–1129. <https://doi.org/10.1134/S1064229313120089>

Dregne H.E. Soils of arid regions. Amsterdam. 1976. 237 p.

Du X., Hu H., Wang T., Zou L., Zhou W., Gao H., Ren X., Wang J., Hu S. Long-term rice cultivation increases contributions of plant and microbial-derived carbon to soil organic carbon in saline-sodic soils. Science of The Total Environment. 2023. Vol. 904. P. 166713. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166713>

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.

Liu B., Guo C., Xu J., Zhao Q., Chadwick D., Gao X., Zhou F., Lakshmanan P., Wang X., Guan X., Zhao H., Fang L., Li S., Bai Z., Ma L., Chen X., Cui Z., Shi X., Zhang F., Chen X., Li Z. Co-benefits for net carbon emissions and rice yields through improved management of organic nitrogen and water. Nature Food. 2024. Vol. 5. P. 241–250. <https://doi.org/10.1038/s43016-024-00940-z>

Liu J., Wang N., Wang H., Zhao C., Huang N., Zhao X. Evaluation on the migrating quantity of fluorine among water-soil-rice system in soda saline-alkali soil as paddy field is developed. Journal of Agriculture and Food Research. 2025. Vol. 23. P. 102264. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2025.102264>

Nascimento G., Catala-Forner M., Villegas D., Ferre O., Tomàs N., Cantero-Martínez C. Enhancing soil organic carbon and structure in Mediterranean rice systems through cover cropping. Soil and Tillage Research. 2026. Vol. 255. P. 106777. <https://doi.org/10.1016/j.still.2025.106777>

Nazarenko O. Regional climate change in the south of Rostov region: A case of arid steppe. E3S Web of Conferences. 2023. Vol. 407. P. 02006. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202340702006>

Wen S., Cui N., Wang Y., Gong D., Wang Z., Xing L., Wu Z., Zhang Y. Effect of biochar application on yield, soil carbon pools and greenhouse gas emission in rice fields: A global meta-analysis. Agricultural and Forest Meteorology. 2025. Vol. 369. P. 110571. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2025.110571>

Zhidkova A.Y., Zarubina R.V., Panova V.A., Saenko N.M. The issue of the change of the climatic conditions of the Rostov region of the Russian Federation. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. Vol. 548. Biodiversity and Ecosystem Stability. P. 072052. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/548/7/072052>

Received 11 August 2025

Accepted 01 September 2025

Published 11 September 2025

About the authors:

Olga S. Bezuglova – Doctor of Biological Sciences, Professor, Professor of the Department of Soil Science and Land Resources Assessment, Southern Federal University (Rostov-on-Don, Russia); lola314@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4180-4008>

Alla V. Kushnareva – Deputy Minister, Ministry of Natural Resources and Environment of the Rostov Region (Rostov-on-Don, Russia); avknadzor@list.ru; <https://orcid.org/0009-0007-0363-3996>

Sergey N. Gorbov – Doctor of Biological Sciences Russia, Associate Professor, Head of the Laboratory of Biogeochemistry, Southern Federal University (Rostov-on-Don, Russia); gorbow@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0174-1631>

Alina A. Omelyanchuk – leading specialist, Ministry of Natural Resources and Environment of the Rostov Region (Rostov-on-Don, Russia); alinka-kush@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0001-8524-7736>

Suleiman S. Tagiverdiev – Candidate of Biological Sciences, Leading Researcher in the Biogeochemistry laboratories, Southern Federal University (Rostov-on-Don, Russia); ticoo@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4422-1094>

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/)



Ризосферный бактериобиом и продукция томатов при внесении минеральных удобрений в условиях открытого грунта на юге Западной Сибири

© 2025 Н. Б. Наумова ¹, Т. В. Нечаева ¹, О. А. Батурина ², А. А. Кирпиков¹, О. А. Савенков ¹,
М. Р. Кабилов ²

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

²ФГБУН Институт химической биологии и фундаментальной медицины СО РАН, проспект Академика
Лаврентьева, 8, г. Новосибирск, 630090, Россия

Цель исследования. Изучение влияния внесения минеральных удобрений на продукционные показатели томата и биоразнообразие микробиома его ризосферы на фоне градиента почвенно-экологических условий, сформированного четырьмя опытными участками, расположенными в лесостепной зоне Западной Сибири.

Место и время проведения. Микрополевые опыты по выращиванию томата (*Lycopersicon esculentum* Mill.) сорта Зырянка проведены на четырёх участках с агросерыми почвами в Новосибирской области в 2021 году. Опыты включали два варианта в трёхкратной повторности: без удобрений (Контроль) и с внесением полного минерального удобрения в дозе, эквивалентной N60P60K60. Географические координаты месторасположения опытных участков варьировали в пределах от 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 почв на опытных участках. Отобранные до закладки и по окончании опыта почвенные образцы проанализировали на содержание органического вещества, нитратного азота, легкоподвижного фосфора, обменных калия, кальция и магния, а также определили кислотность почвы ($pH_{вод}$). В ходе опыта автоматически регистрировали температуру воздуха и почвы. Во время уборки урожая томата учитывали количество и массу плодов на каждой делянке, надземную и подземную фитомассу. Состав и структуру бактериобиома почвы ризосферы томата оценивали с помощью 16S-метабаркодинга. Для статистической обработки полученных данных применили анализ дисперсии, главных компонент и двухблоковой множественной регрессии методом частных наименьших квадратов, для чего использовали пакеты программ Statistica v.13.1 и PAST 4.16.

Основные результаты. Всего в почве ризосферы томата выявлено 7935 операционных таксономических единиц, подавляющее число которых (45% видового богатства бактерий) представляли тип *Pseudomonadota*. По относительному обилию последовательностей безусловным доминантом был тип *Actinomycetota* ($\geq 33\%$). Другими крупными (относительное обилие $>10\%$) доминантами были *Pseudomonadota*, *Bacillota* и *Acidobacteriota*. Внесение удобрений на 15% повысило обилие *Actinomycetota*. Среди доминантных родов некоторые (*Pseudarthrobacter*, *Streptomyces*) увеличили обилие в 2,3 раза, а другие роды (относящиеся к *Acidobacteria*_Gp6, *Hyphomicrobiales*, *Mucosoccales* и *Iamiaeae*), наоборот, при внесении NPK уменьшили свое относительное обилие. Всего из 880 выявленных родов у 252 относительное обилие изменилось под влиянием внесения NPK, но за исключением шести доминантных родов, они были минорными или редкими. Удобрения немного, но статистически значимо снизили величину индексов α -биоразнообразия Шеннона и Симпсона, несколько повысив индексы доминирования Бергера-Паркера и D-Симпсона. Последние имели тенденцию к положительной корреляции с продукционными характеристиками растений томата, а индексы Шеннона, Симпсона – с почвенными свойствами. В среднем по всем опытным участкам, то есть на фоне заметного варьирования почвенных свойств, внесение минеральных удобрений увеличило продукционные показатели томата (количество и массу плодов, надземную и подземную фитомассу); при этом статистически значимой корреляции между этими показателями и свойствами почвы перед началом опыта не выявлено.

Заключение. Бактериобиом ризосферы является динамичным и варьирует под действием различных факторов, в том числе внесения минеральных удобрений. Это свидетельствует о возможности целенаправленной модификации бактериобиома ризосферы в частности и агромикробиома в целом в более благоприятную сторону для роста и развития растений. С потеплением климата и удлинением безморозного периода на юге Западной Сибири, мелко- и среднемасштабное производство томатов в открытом грунте выглядит перспективным даже при использовании небольших доз минеральных удобрений. Понимание и учёт влияния удобрений и их доз на агромикробиом и продукционные особенности

сельскохозяйственных культур в современных условиях будут способствовать поддержанию здоровья почвы и растений, а, следовательно, и повышению качества растительной продукции.

Ключевые слова: агросерая почва; минеральные удобрения; томат; 16S-метабаркодинг; почвенно-экологические условия.

Цитирование: Наумова Н.Б., Нечаева Т.В., Батурина О.А., Кирпиков А.А., Савенков О.А., Кабилов М.Р. Ризосферный бактериобиом и продукция томатов при внесении минеральных удобрений в условиях открытого грунта на юге Западной Сибири // Почвы и окружающая среда. 2025. Том 8. № 3. e336. DOI: [10.31251/pos.v8i3.336](https://doi.org/10.31251/pos.v8i3.336)

ВВЕДЕНИЕ

Численность мирового населения по прогнозам вырастет к 2030 г. до 8,5 млрд человек (United Nations..., 2023), что обусловит необходимость повышения производства растениеводческой продукции. Последнее нельзя достичь без расширения ассортимента удобрений и поиска оптимальных их доз. Применение минеральных удобрений в настоящее время обеспечивает более половины продовольствия на планете. Хотя разрабатываются новые виды удобрений, обеспечивающие замедленное или контролируемое высвобождение питательных элементов, применяются специальные штаммы/консорциумы микроорганизмов, способствующие улучшению минерального питания растений, комбинируются различные минеральные, органические и микробные агенты в комплексных препаратах, используются почвоулучшители (Shanmugavel et al., 2023), рынок минеральных удобрений, в целом, будет расти (International Fertilizer Association (IFA)..., 2023) и применение традиционных форм минеральных удобрений в кратко- и среднесрочной перспективе будет увеличиваться. Это особенно актуально и перспективно в нашей стране, являющейся крупнейшим производителем минеральных удобрений и обладающей большой площадью сельскохозяйственных угодий. Несмотря на то, что площадь пахотных земель отнюдь не является лимитирующим фактором продовольственной безопасности страны, качество почвы имеет важное значение.

Ключевым агентом и компонентом, обеспечивающим качество и здоровье почвы, является микробиота (Berendsen et al., 2012; Araújo et al., 2025). Почвенный и растительный микробиом играет огромную роль в поглощении растениями питательных элементов из почвы, устойчивости сельскохозяйственных культур к заболеваниям и стрессам. Поэтому в контексте изменения климата, с одной стороны, и относительной доступности экологических геномных технологий (баркодинга, метабаркодинга), с другой стороны, нельзя переоценить важность каталогизации почвенного, ризосферного и эндогенного микробиома сельскохозяйственных растений, его временной/фенологической динамики и изменения при разных агрономических приемах. В настоящее время метабаркодинг широко используют для оценки биоразнообразия в микробиомах (Hassan et al., 2022). Метод основан на амплификации различных фрагментов генома и высокопроизводительном секвенировании полученных ампликонов, которые соответствуют определенным маркерам (ДНК-баркодам) и получены с тотальной геномной ДНК, выделенной из исследуемых образцов (микробиомов). Для изучения таксономического разнообразия прокариот анализируют ген 16S рРНК, в случае грибов маркером выступает ITS, для микроводорослей это ген 18S рРНК и т.д. Метабаркодинг широко используют как в экологических работах по анализу болот, почв, водоемов и рек, воздуха (Семенов, 2019; Уманская и др., 2023; Pawlowski et al., 2022), так и при изучении микробиомов, ассоциированных с макроорганизмами, в том числе, растениями (Rai et al., 2022). Сегодня не вызывает сомнения, что информация о составе, структуре и ключевых компонентах микробиома в зоне влияния корней растений важна для повышения устойчивости сельскохозяйственных культур к стрессам (Singh et al., 2023), патогенам (Chen et al., 2023), изменению климата (Raza, Bebbber, 2022), для модификации микробиома ризосферы (Afridi et al., 2022), выявления роли редких компонентов микробиоты в продуцировании агроактивных метаболитов (Oyedoh et al., 2023) и других аспектов; однако такого рода исследования в настоящее время еще находятся на начальных стадиях.

Знания об изменении агромикробиома при внесении в почву удобрений позволят оценить потенциал направленной модификации естественного почвенного/ризосферного/эндофитного микробиома с целью снижения присутствия патогенов и повышения полезных микроорганизмов путем варьирования состава и доз удобрений и/или пространственно-временной диверсификации культур (покровные культуры, севообороты).

Томат является одной из основных овощных культур в мире, в том числе и в России. Ежегодное производство томатов всеми типами хозяйств нашей страны составляет около трех миллионов тонн: по данным Международной сельскохозяйственной и продовольственной организации ООН (FAOSTAT ..., 2024) в 2023 г. Россия вырастила 2,7 млн тонн томатов, заняв двенадцатое место в мире, после стран

с более теплым климатом (Китай, Индии, Турции, США, Египта, Италии, Мексики, Бразилии, Испании, Нигерии и Ирана).

В последние годы возрос интерес к томату как основе для разработки новых функциональных продуктов питания. Для этого особенно важно сбалансированное обеспечение растений томата питательными элементами, что можно осуществить путем внесения минеральных удобрений. Так, ранее в микрополевым опыте в пределах одного участка показано, что внесение минеральных удобрений (NPK) привело к изменению бактериобиома и микобиома корней и ризосферы томата (Naumova et al., 2022). В данной статье приведены результаты микрополевого опыта, проведенного по одинаковой схеме на четырех участках с агросерыми почвами в лесостепной зоне Западной Сибири, с целью изучения влияния почвенно-экологических условий и действия минеральных удобрений на продукционные показатели томата и состав бактериобиома его ризосферы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальные участки. Микрополевым опытом провели в 2021 г. на четырех участках (далее обозначенных У-1, У-2, У-3 и У-4) в различных административных районах Новосибирской области в лесостепной зоне Западной Сибири: 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 – 55.260964° с.ш., 83.528411 в.д. Почвы – агросерые среднесуглинистые (Классификация..., 2004), длительное время (30 лет и более) находящиеся в сельскохозяйственном использовании и по своим свойствам (табл. 1), в целом, благоприятные для выращивания овощных культур. Проведение опыта на участках с исходно различающимися почвенными свойствами позволяет установить не только действие внесения минеральных удобрений на продукцию томата и состав микробиома его корневой зоны, но и распространить полученный результат на другие почвы со свойствами в пределах изученного в опыте диапазона.

Таблица 1

Свойства почв опытных участков до начала опыта (среднее ± стандартное отклонение)

Показатель	Опытный участок			
	У-1	У-2	У-3	У-4
pH _{вод}	7,2 ± 0,2 b*	7,5 ± 0,1 c	8,0 ± 0,1 d	6,8 ± 0,1 a
C _{орг} , %	4,1 ± 0,1 a	9,3 ± 1,7 c	11,2 ± 0,2 c	7,4 ± 0,1 b
C _{неорг} , %	0,2 ± 0,0 a	0,5 ± 0,0 a	1,7 ± 0,6 b	0,3 ± 0,0 a
NO ₃ , мг/кг	452 ± 80 b	429 ± 40 b	243 ± 35 a	239 ± 13 a
P ₂ O ₅ , мг/кг	8,0 ± 1,6 bc	15,8 ± 9,9 c	34,8 ± 2,7 d	1,1 ± 0,1 ab
K, мг/100 г	22 ± 1 b	18 ± 3 a	19 ± 1 ab	28 ± 1 c
Ca, мг/100 г	336 ± 9 a	568 ± 57 c	814 ± 76 d	489 ± 9 bc
Mg, мг/100 г	23 ± 1 a	38 ± 5 b	57 ± 5 d	46 ± 1 c

Примечание.

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

Схема опыта. Опыт проводили с томатом (*Lycopersicon esculentum* Mill.) сорта Зырянка селекции Центрального Сибирского ботанического сада СО РАН (Новосибирск). Использовали два варианта опыта: без удобрений (Контроль) и с внесением полного минерального удобрения в дозе, эквивалентной N60P60K60 (далее – NPK) с дробным внесением в течение сезона. Опыт проводили по одинаковой схеме на четырёх участках в трёхкратной повторности. На микроделянку размером 0,5×0,5 м в начале июня высадили по одному растению томата возрастом 50 дней. Применяли удобрение Нитрофоска (ООО «Агросинтез», Кемерово, Россия): первую дозу внесли через неделю после высадки рассады и повторяли это каждые две недели в течение вегетации (вплоть до начала сентября). Всего за вегетацию внесли по 6 г N, P и K на 1 м², что эквивалентно 60 кг/га. Дозы минеральных удобрений выбрали на основе рекомендуемых под томаты на черноземных почвах: 60–90 кг/га N и K₂O, 90–120 кг/га P₂O₅ (Минеев, 2006, с. 625). На всех опытных участках агротехника в течение вегетационного сезона была одинаковой.

На участках 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 (по два на каждом участке). После обработки записанных показаний по окончании опыта были рассчитаны суммы дневных, ночных и суточных температур (табл. 2) за период вегетации растений томата (с 2–5 июня по 2–5 сентября 2021 года).

Таблица 2

Суммы температур ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{сут}$) воздуха и почвы на опытных участках
(среднее $\pm$ стандартное отклонение, $n = 3$)

Показатель	Опытный участок			
	У-1	У-2	У-3	У-4
Воздух (2 м от поверхности)				
Сумма ночных температур	518 $\pm$ 7	472 $\pm$ 12	503 $\pm$ 26	509 $\pm$ 27
Сумма дневных температур	1240 $\pm$ 21	1139 $\pm$ 74	1278 $\pm$ 90	1164 $\pm$ 23
Сумма температур	1758 $\pm$ 14	1611 $\pm$ 82	1763 $\pm$ 91	1667 $\pm$ 32
Почва, глубина 5 см				
Сумма ночных температур	604 $\pm$ 6	644 $\pm$ 13	607 $\pm$ 22	663 $\pm$ 23
Сумма дневных температур	1114 $\pm$ 32	1010 $\pm$ 14	1028 $\pm$ 26	1059 $\pm$ 42
Сумма температур	1717 $\pm$ 38	1654 $\pm$ 19	1635 $\pm$ 16	1722 $\pm$ 64
Почва, глубина 15 см				
Сумма ночных температур	652 $\pm$ 7	646 $\pm$ 10	632 $\pm$ 6	667 $\pm$ 3
Сумма дневных температур	1040 $\pm$ 20	1011 $\pm$ 36	984 $\pm$ 7	1026 $\pm$ 4
Сумма температур	1691 $\pm$ 26	1657 $\pm$ 44	1616 $\pm$ 6	1693 $\pm$ 7

Отбор и анализ почвенных образцов. Образцы почвы из слоя 0–20 см отбирали в начале опыта перед внесением удобрений и высадкой рассады томата, а также по окончании опыта. 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 и легкоподвижного фосфора определяли в вытяжке 0,015 М K_2SO_4 при соотношении почва:экстрагент равном 1:5; обменных калия (К), кальция (Са) и магния (Mg) – атомно-абсорбционным методом в вытяжке 1 М $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ (почва:экстрагент = 1:10); кислотность ($\text{pH}_{\text{вод}}$) – потенциометрическим методом (почва:вода = 1:2,5). Содержание углерода и макроэлементов рассчитали на сухую массу почвы (105°C в течение 24 часов). Свойства почвы, отобранной перед началом опыта, представлены в таблице 1.

Отбор растительных образцов. Плоды томата собирали по мере достижения технической зрелости и сразу взвешивали. По окончании вегетации растения выкапывали и отрезали надземную часть, которую взвешивали. Корни осторожно встряхивали, после чего оставшуюся на корнях почву тщательно собирали в полиэтиленовые пакеты как почву ризосферы (Barillot et al., 2013) и сразу помещали в холодильник для хранения при -20°C до выделения ДНК. После отбора почвы корни отмывали водопроводной водой, высушивали в тени и взвешивали. Величины массы плодов, средней и максимальной массы, а также надземной и подземной фитомассы томата даны в сырой массе.

Экстракция, амплификация и секвенирование ДНК. Выделение ДНК из собранных образцов почвы ризосферы томата проводили с помощью набора ZymoBIOMICS DNA Microprep Kit (Zymo Research) в соответствии с инструкцией производителя. Для механического разрушения образца использовали TissueLyser II (Qiagen) 10 мин при 30 Герц. Качество ДНК оценивали с помощью электрофореза в 1% агарозном геле, а количество – на Qubit (Life Technologies) и на Nanodrop (Thermo Fisher Scientific).

Регион V3-V4 гена 16S рРНК был амплифицирован с помощью праймеров 343F (5'-CTCCTACGGRRSGCAGCAG-3') и 806R (5'-GGACTACNVGGGTWTCTAAT-3'); праймеры содержали адаптерные последовательности (Illumina), линкер и баркод (Fadrosh, 2014).

Амплификацию проводили в 50 мкл реакционной смеси, содержащей 0,7 U Phusion Hot Start II High-Fidelity и $1\times$ Phusion GC buffer (Thermo Fisher Scientific), по 0,2 мкМ прямого и обратного праймеров, 10 нг ДНК, 2,3 мМ MgCl_2 (Sigma-Aldrich) и 0,2 мМ dNTP (Life Technologies). Условия термоциклирования: первый шаг: денатурация 98°C – 1 мин., далее 30 циклов: 98°C – 15 сек, 62°C – 15 сек, 72°C – 15 сек, последний шаг: 72°C – 10 мин. Ампликоны смешивали по 200 нг каждый и чистили в 1% агарозном геле с помощью набора MinElute Gel Extraction Kit (Qiagen). Секвенирование полученных ДНК-библиотеки проводили в ЦКП “Геномика” (ИХБФМ СО РАН) на секвенаторе MiSeq (Illumina), используя набор Reagent Kit v3 (2×300 , Illumina). Полученные последовательности размещены в открытом доступе в Архиве прочтений последовательностей (Sequence Reads Archive, SRA); ссылка: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/bioproject/?term=PRJNA1346536>, номер проекта PRJNA1346536.

Биоинформатический анализ. Полученные парные последовательности анализировали с помощью UPARSE скриптов (Edgar, 2013), используя Usearch v11.0.667 (Edgar, 2010). Биоинформатическая обработка включала перекрывание парных ридов, фильтрацию по качеству и длине, учет одинаковых последовательностей, отбрасывание синглетонов, удаление химер и получение OTU с помощью алгоритма кластеризации UPARSE (Edgar, 2016a). Таксономическая принадлежность последовательностей OTU определялась с помощью SINTAX (Edgar, 2016b) и референсной базы 16S RDP training set v19 (Wang et al., 2007).

Статистический анализ. Статистический анализ проводили с помощью пакета программ Statistica v.13.3 (TIBCO Software Inc., Palo Alto, CA, USA) и PAST v.4.16 (Hammer et al., 2001). В общей линейной модели дисперсионного анализа внесение удобрений считали фиксированным фактором, а удаленные друг от друга экспериментальные участки рассматривали как случайный фактор. Двухблочные регрессионные модели строили методом частных наименьших квадратов (Partial Least Squares, PLS).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Продукционные характеристики растений томата. Дисперсионный анализ выявил отсутствие статистически значимого влияния фактора «опытный участок» на все изученные показатели продукции томата (табл. 3), хотя этот фактор обусловил значительную часть дисперсии подземной фитомассы и максимальной массы плода. Напомним, что фактор «опытный участок» является комбинированным, то есть включает совокупность разных факторов окружающей среды (от почвенных свойств до погодных условий) на каждом участке. Фактор «удобрение» оказал влияние на количество и массу плодов, а также на надземную, подземную и общую фитомассу растения; вероятность отсутствия влияния этого фактора на среднюю массу плода считаем незначительной ($0,05 \leq p \leq 0,10$).

Таблица 3

Вклад факторов (%) в дисперсию показателей продукции томата

Показатель	Фактор		
	Опытный участок (У)	Удобрение (Уд)	Взаимодействие У × Уд
Количество плодов	18,2 (0,206)*	36,6 (0,025)	6,4 (0,474)
Масса плодов	17,5 (0,115)	51,5 (0,007)	3,7 (0,557)
Максимальная масса плода	78,0 (0,002)	0,7 (0,210)	0,9 (0,874)
Средняя масса плода	29,3 (0,225)	25,5 (0,079)	11,1 (0,196)
Надземная фитомасса	20,5 (0,103)	47,0 (0,009)	3,9 (0,552)
Подземная фитомасса	49,7 (0,021)	21,6 (0,017)	2,8 (0,637)
Общая фитомасса	15,3 (0,091)	54,5 (0,004)	2,6 (0,680)

Примечание.

*В скобках указана вероятность (p) отсутствия влияния фактора.

Внесение минеральных удобрений увеличило в 1,5 раза число плодов томата и в 1,8 раза – массу плодов с одного растения (табл. 4), не повлияв при этом на максимальную и почти не повлияв на среднюю массу плода. Надземная и общая фитомасса растений томата под влиянием удобрений увеличилась в 1,8 раза, подземная фитомасса – в 2,3 раза.

По некоторым показателям разница между опытными участками была довольно значительной. Так, по массе плодов с одного растения размах средних значений составил 1,7–2,7 кг, по максимальной массе плода с одного растения – 59–172 г (табл. 5).

Взаимосвязь свойств почвы и продукции томата. Статистически значимой корреляции (ни Пирсона, ни Спирмена) между свойствами почвы перед началом опыта и продукционными показателями растений томата выявлено не было (данные не приведены).

Бактериобиом почвы ризосферы томата. Всего в исследовании было выявлено 7935 операциональных таксономических единиц (ОТЕ) из 880 родов, 386 семейств, 199 порядков, 104 классов и 30 типов бактерий. Некоторые кластеры последовательностей были идентифицированы только до уровня *Bacteria*. Значительная часть ОТЕ (1807, или 45% общего числа) представляла тип *Pseudomonadota*. К типу *Bacillota* относились 1182 ОТЕ (15%). Третьим по числу ОТЕ оказался тип *Actinomycetota* с 826 ОТЕ (10,4%), далее шел *Bacteroidota* с 630 (8%), следом за ним *Acidobacteriota* с 605 ОТЕ (8%) и *Planctomycetota* с 581 ОТЕ (7%). Остальные типы в общее число ОТЕ вносили менее 5% каждый.

Таблица 4

Структура продукции томата
(среднее по всем участкам $\pm$ стандартное отклонение, $n = 12$ для каждого варианта опыта)

Показатель	Удобрение		Величина p
	Контроль	NPK	
Количество плодов, шт./растение	31 ± 11	47 ± 10	0,001
Масса плодов, г/растение	1583 ± 580	2813 ± 663	0,000
Максимальная масса плода, г/растение	106 ± 51	114 ± 50	0,456
Средняя масса плода, г/растение	51 ± 6	61 ± 12	0,079
Надземная фитомасса, кг/растение	434 ± 199	795 ± 202	0,000
Подземная фитомасса, кг/растение	35 ± 29	79 ± 54	0,002
Общая фитомасса, кг/растение	2052 ± 736	3686 ± 821	0,000
Отношение надземной фитомассы к массе плодов	$0,28 \pm 0,10$	$0,29 \pm 0,07$	0,742

Таблица 5

Структура продукции томата на разных опытных участках
(среднее по обоим вариантам опыта на участке $\pm$ стандартное отклонение, $n = 6$ для каждого участка)

Показатель	Опытный участок			
	У-1	У-2	У-3	У-4
Количество плодов, шт./растение	42 ± 13 ab	34 ± 11 a	34 ± 14 a	47 ± 13 b
Масса плодов, кг/растение	$2,66 \pm 0,86$ b	$1,71 \pm 0,61$ a	$2,03 \pm 1,10$ ab	$2,39 \pm 0,76$ b
Максимальная масса плода, г/растение	$172,3 \pm 41,7$ c	$59,3 \pm 5,9$ a	$124,2 \pm 24,2$ b	$83,9 \pm 10,9$ a
Средняя масса плода, г/растение	$64,6 \pm 10,8$ b	$51,3 \pm 5,4$ a	$56,3 \pm 13,9$ ab	$50,7 \pm 4,5$ a
Надземная фитомасса, г/растение	534 ± 184 a	492 ± 314 a	629 ± 282 a	802 ± 228 c
Подземная фитомасса, кг/растение	38 ± 55 a	24 ± 17 a	55 ± 23 a	112 ± 39 b
Общая фитомасса, кг/растение	$3,24 \pm 1,08$ b	$2,23 \pm 0,92$ a	$2,71 \pm 1,39$ ab	$3,30 \pm 1,01$ b
Отношение надземной фитомассы к массе плодов	$0,20 \pm 0,02$ a	$0,27 \pm 0,11$ ab	$0,32 \pm 0,07$ b	$0,34 \pm 0,03$ b

Примечание.

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

По относительному обилию нуклеотидных последовательностей безусловным доминантом был тип *Actinomycetota*, в обоих вариантах опыта составивший более трети общего числа последовательностей (табл. 6). Другими крупными (т.е. с относительным обилием $>10\%$) доминантами были *Pseudomonadota*, *Bacillota* и *Acidobacteriota*.

Как и в случае продукционных показателей растений томата, основной вклад в дисперсию относительного обилия доминантных типов и родов бактерий вносил фактор «опытный участок» (см. табл. 6); при этом у других таксонов картина была такая же, поэтому полученные для них результаты по вкладу факторов в дисперсию не приведены.

Таблица 6

Вклад факторов (%) в дисперсию относительного обилия доминантных типов и родов бактерий в почве ризосферы томата

Таксон	Фактор		
	Опытный участок (У)	Удобрение (Уд)	Взаимодействие У × Уд
Тип бактерий			
<i>Actinomycetota</i>	54 (0,093)**	10 (0,164)	9 (0,174)
<i>Pseudomonadota</i>	11 (0,718)	4 (0,495)	22 (0,169)
<i>Bacillota</i>	66 (0,024)	1 (0,603)	4 (0,536)
<i>Acidobacteriota</i>	55 (0,077)	14 (0,112)	8 (0,173)
<i>Bacteroidota</i>	49 (0,031)	1 (0,569)	4 (0,734)
<i>Verrucomicrobiota</i>	84 (0,004)	0 (0,900)	1 (0,863)
<i>Planctomycetota</i>	68 (0,019)	2 (0,267)	4 (0,563)
<i>Chloroflexota</i>	76 (0,005)	1 (0,393)	2 (0,768)
<i>Gemmatimonadota</i>	86 (0,022)	2 (0,414)	5 (0,030)
некл.* <i>Bacteria</i>	35 (0,055)	10 (0,072)	4 (0,737)
Род бактерий			
<i>Pseudarthrobacter</i>	45 (0,211)	10 (0,266)	16 (0,069)
<i>Acidobacteria</i> Gp6	53 (0,101)	18 (0,104)	10 (0,086)
<i>Acidobacteria</i> Gp16	79 (0,003)	2 (0,149)	1 (0,762)
<i>Gaiella</i>	88 (0,003)	1 (0,182)	1 (0,606)
<i>Nocardioideis</i>	41 (0,101)	10 (0,142)	8 (0,428)
<i>Microlunatus</i>	99 (0,000)	0 (0,892)	1 (0,069)
<i>Streptomyces</i>	55 (0,007)	10 (0,020)	1 (0,883)
<i>Mycobacterium</i>	90 (0,008)	0 (0,553)	3 (0,158)
<i>Flavobacterium</i>	11 (0,492)	3 (0,432)	11 (0,531)
<i>Ilumatobacter</i>	79 (0,039)	3 (0,346)	7 (0,038)
некл. <i>Actinomycetota</i>	59 (0,000)	1 (0,054)	0 (0,993)
некл. <i>Hyphomicrobiales</i>	82 (0,023)	5 (0,185)	5 (0,053)
некл. <i>Hyphomicrobiaceae</i>	79 (0,000)	2 (0,264)	2 (0,720)
некл. <i>Actinobacteria</i>	66 (0,005)	4 (0,073)	1 (0,848)
некл. <i>Solirubrobacterales</i>	85 (0,004)	1 (0,298)	2 (0,570)
некл. <i>Ilumatobacteraceae</i>	71 (0,027)	5 (0,194)	5 (0,310)
некл. <i>Betaproteobacteria</i>	48 (0,052)	7 (0,149)	5 (0,554)
некл. <i>Micromonosporaceae</i>	70 (0,002)	1 (0,159)	1 (0,914)
некл. <i>Spartobacteria</i> gis	96 (0,000)	0 (0,367)	1 (0,629)
некл. <i>Bacillota</i>	63 (0,021)	1 (0,259)	1 (0,964)
некл. <i>Intrasporangiaceae</i>	59 (0,102)	9 (0,220)	11 (0,067)
некл. <i>Bacillaceae</i>	84 (0,014)	0 (0,896)	4 (0,228)
некл. <i>Мухосcoccales</i>	59 (0,101)	11 (0,189)	11 (0,057)
некл. <i>Iamiaceae</i>	74 (0,000)	6 (0,003)	0 (0,982)
некл. <i>Thermoleophilia</i>	49 (0,037)	7 (0,117)	4 (0,648)

Примечание.

*«некл.» обозначает «неклассифицированные».

**В скобках указана вероятность (p) отсутствия влияния фактора.

Внесение минеральных удобрений повысило на 15% обилие *Actinomycetota* – основного доминантного типа в почве ризосферы томата на всех участках и снизило на 20% обилие другого доминанта – *Acidobacteriota* (табл. 7).

Среди доминантных кластеров последовательностей уровня родов несколько кластеров изменили свое относительное обилие (табл. 8). Так, *Pseudarthrobacter* при внесении NPK увеличил свое обилие в 2,3 раза, *Streptomyces* – в 1,3 раза, а относящийся к семейству *Intrasporangiaceae* кластер – в 1,7 раза. У других кластеров – представителей *Acidobacteria* Gp6, *Hyphomicrobiales*, *Мухосcoccales* и *Iamiaceae* – относительное обилие при внесении NPK снизилось в 1,1–1,3 раза. Всего же из 880 выявленных на уровне родов кластеров, у 252 относительное обилие изменилось под влиянием внесения NPK, но, за исключением шести доминантных родов (см. табл. 8), это были минорные или редкие роды.

Таблица 7

Относительное обилие доминантных типов бактерий в почве ризосферы томата
(среднее по всем участкам $\pm$ стандартное отклонение, $n = 12$ для каждого варианта опыта)

Показатель	Удобрение		Величина p
	Контроль	NPK	
<i>Actinomycetota</i>	$34,1 \pm 5,2$	$39,2 \pm 9,9$	0,023
<i>Pseudomonadota</i>	$22,9 \pm 2,4$	$21,6 \pm 3,7$	0,300
<i>Bacillota</i>	$13,3 \pm 4,1$	$12,8 \pm 3,3$	0,621
<i>Acidobacteriota</i>	$12,8 \pm 3,0$	$10,2 \pm 3,7$	0,007
<i>Bacteroidota</i>	$2,0 \pm 0,6$	$2,2 \pm 0,6$	0,681
<i>Verrucomicrobiota</i>	$2,6 \pm 1,8$	$2,6 \pm 1,6$	0,920
<i>Planctomycetota</i>	$1,5 \pm 1,0$	$1,3 \pm 0,8$	0,271
<i>Chloroflexota</i>	$1,1 \pm 0,6$	$1,0 \pm 0,7$	0,548
некл.* <i>Bacteria</i>	$5,2 \pm 1,0$	$4,3 \pm 1,7$	0,095

Примечание.

*«некл.» обозначает «неклассифицированные».

Таблица 8

Относительное обилие доминантных родов бактерий в почве ризосферы томата
(среднее по всем участкам $\pm$ стандартное отклонение, $n = 12$ для каждого варианта опыта)

Показатель	Удобрение		Величина p
	Контроль	NPK	
<i>Pseudarthrobacter</i>	$3,1 \pm 2,3$	$7,1 \pm 8,7$	0,034
некл.* <i>Acidobacteria Gp6</i>	$5,6 \pm 1,5$	$4,2 \pm 1,6$	0,002
некл. <i>Acidobacteria Gp16</i>	$3,8 \pm 2,0$	$3,3 \pm 1,9$	0,246
<i>Gaiella</i>	$5,0 \pm 2,2$	$4,5 \pm 2,4$	0,189
<i>Nocardioideis</i>	$1,3 \pm 0,8$	$2,0 \pm 0,6$	0,068
<i>Micrococcus</i>	$1,5 \pm 1,4$	$1,6 \pm 1,6$	0,806
<i>Streptomyces</i>	$0,8 \pm 0,3$	$1,0 \pm 0,3$	0,049
<i>Mycobacterium</i>	$1,0 \pm 0,5$	$0,9 \pm 0,5$	0,363
<i>Flavobacterium</i>	$0,7 \pm 0,6$	$1,1 \pm 1,3$	0,440
некл. <i>Actinomycetota</i>	$3,4 \pm 1,1$	$3,2 \pm 1,4$	0,607
некл. <i>Hyphomicrobiales</i>	$4,8 \pm 0,2$	$4,4 \pm 0,1$	0,008
некл. <i>Hyphomicrobiaceae</i>	$2,3 \pm 1,1$	$2,0 \pm 0,8$	0,264
некл. <i>Actinobacteria</i>	$2,2 \pm 0,6$	$2,0 \pm 0,7$	0,181
некл. <i>Solirubrobacterales</i>	$1,7 \pm 0,7$	$1,5 \pm 0,8$	0,312
некл. <i>Flummatobacteraceae</i>	$1,7 \pm 0,6$	$1,4 \pm 0,7$	0,076
некл. <i>Betaproteobacteria</i>	$1,5 \pm 0,5$	$1,2 \pm 0,6$	0,120
некл. <i>Micromonosporaceae</i>	$1,3 \pm 0,6$	$1,2 \pm 0,7$	0,452
некл. <i>Spartobacteria gis</i>	$1,3 \pm 1,6$	$1,2 \pm 1,4$	0,427
некл. <i>Bacillota</i>	$1,2 \pm 0,7$	$1,2 \pm 0,7$	0,681
некл. <i>Intrasporangiaceae</i>	$0,9 \pm 0,5$	$1,5 \pm 1,3$	0,018
некл. <i>Bacillaceae</i>	$1,1 \pm 0,6$	$1,1 \pm 0,5$	0,859
некл. <i>Mycococcales</i>	$1,2 \pm 0,5$	$0,9 \pm 0,3$	0,009
некл. <i>Iamiaceae</i>	$1,0 \pm 0,2$	$0,9 \pm 0,3$	0,045
некл. <i>Thermoleophilia</i>	$1,0 \pm 0,2$	$0,9 \pm 0,2$	0,122

Примечание.

*«некл.» обозначает «неклассифицированные».

Между участками выявлены различия по относительному обилию таксон-специфичных последовательностей; величины относительного обилия доминантных типов и родов бактерий в почве ризосферы томата приведены в таблицах 9 и 10. Примечательно, что у второго по величине относительного обилия на всех участках типа *Pseudomonadota* не было статистически значимых различий между участками.

Таблица 9

Относительное обилие доминантных типов бактерий в почве ризосферы томата на разных участках (среднее по всем вариантам опыта на участке $\pm$ стандартное отклонение, $n = 6$ для каждого участка)

Показатель	Опытный участок			
	У-1	У-2	У-3	У-4
<i>Actinomycetota</i>	44,0 $\pm$ 10,7 с*	37,0 $\pm$ 4,3 b	27,6 $\pm$ 2,5 a	38,0 $\pm$ 1,8 b
<i>Pseudomonadota</i>	22,4 $\pm$ 5,0	20,9 $\pm$ 3,3	23,7 $\pm$ 2,0	22,1 $\pm$ 0,6
<i>Bacillota</i>	10,5 $\pm$ 1,9 a	13,3 $\pm$ 2,4 b	17,6 $\pm$ 3,3 c	10,6 $\pm$ 0,7 a
<i>Acidobacteriota</i>	8,8 $\pm$ 3,5 a	15,6 $\pm$ 3,6 c	11,4 $\pm$ 0,6 b	10,1 $\pm$ 0,3 ab
<i>Bacteroidota</i>	4,1 $\pm$ 1,5 a	2,5 $\pm$ 2,4 a	6,4 $\pm$ 1,2 b	4,3 $\pm$ 0,5 a
<i>Verrucomicrobiota</i>	2,2 $\pm$ 1,0 b	0,9 $\pm$ 0,5 a	2,4 $\pm$ 0,5 b	5,0 $\pm$ 0,7 c
<i>Planctomycetota</i>	1,5 $\pm$ 1,0 b	0,2 $\pm$ 0,1 a	1,8 $\pm$ 0,4 b	2,1 $\pm$ 0,3 b
<i>Chloroflexota</i>	0,6 $\pm$ 0,3 a	1,8 $\pm$ 0,5 c	1,3 $\pm$ 0,2 b	0,7 $\pm$ 0,1 a
некл.** <i>Bacteria</i>	3,6 $\pm$ 1,0 a	5,6 $\pm$ 2,2 b	5,4 $\pm$ 0,2 b	4,4 $\pm$ 0,3 ab

Примечание.

*Разные буквы в строках обозначают различие между значениями (на уровне $P = 0,05$, тест Фишера); отсутствие букв означает отсутствие статистически значимой разницы (здесь и далее в табл. 10).

**«некл.» обозначает «неклассифицированные».

Таблица 10

Относительное обилие доминантных родов бактерий в почве ризосферы томата на разных участках (среднее по всем вариантам опыта на участке $\pm$ стандартное отклонение, $n = 6$ для каждого участка)

Показатель	Опытный участок			
	У-1	У-2	У-3	У-4
<i>Pseudarthrobacter</i>	12,4 $\pm$ 10,3 b*	3,3 $\pm$ 1,5 a	2,2 $\pm$ 1,0 a	2,3 $\pm$ 0,5 a
некл.* <i>Acidobacteria</i> Gp6	3,6 $\pm$ 1,7 a	5,9 $\pm$ 1,7 b	6,3 $\pm$ 0,5 b	3,8 $\pm$ 0,2 a
некл. <i>Acidobacteria</i> Gp16	3,0 $\pm$ 0,8 a	6,5 $\pm$ 1,7 b	2,5 $\pm$ 0,2 a	2,3 $\pm$ 0,3 a
<i>Gaiella</i>	2,6 $\pm$ 0,8 a	5,3 $\pm$ 1,5 b	3,1 $\pm$ 0,3 a	8,0 $\pm$ 0,4 c
<i>Nocardioidea</i>	2,9 $\pm$ 1,2 b	2,6 $\pm$ 2,3 b	1,1 $\pm$ 0,3 a	0,6 $\pm$ 0,2 a
<i>Microtholus</i>	0,7 $\pm$ 0,2 a	0,8 $\pm$ 0,2 a	0,7 $\pm$ 0,1 a	4,0 $\pm$ 0,2 b
<i>Streptomyces</i>	1,0 $\pm$ 0,3 b	0,6 $\pm$ 0,3 a	0,8 $\pm$ 0,1 a	1,2 $\pm$ 0,2 b
<i>Mycobacterium</i>	1,2 $\pm$ 0,2 c	0,7 $\pm$ 0,2 b	0,5 $\pm$ 0,1 a	1,6 $\pm$ 0,1 d
<i>Flavobacterium</i>	0,8 $\pm$ 0,7	1,0 $\pm$ 1,9	1,3 $\pm$ 0,5	0,4 $\pm$ 0,1
некл. <i>Actinomycetota</i>	2,0 $\pm$ 0,5 a	4,6 $\pm$ 1,6 c	3,4 $\pm$ 0,3 b	3,2 $\pm$ 0,1 a
некл. <i>Hyphomicrobiales</i>	2,1 $\pm$ 0,9 a	2,4 $\pm$ 0,6 a	2,1 $\pm$ 0,2 a	4,6 $\pm$ 0,3 b
некл. <i>Hyphomicrobiaceae</i>	2,0 $\pm$ 0,5 b	3,4 $\pm$ 0,8 c	2,2 $\pm$ 0,2 b	1,1 $\pm$ 0,1 a
некл. <i>Actinobacteria</i>	1,8 $\pm$ 0,4 a	3,0 $\pm$ 0,8 b	1,7 $\pm$ 0,2 a	1,9 $\pm$ 0,1 a
некл. <i>Solirubrobacterales</i>	1,2 $\pm$ 0,4 ab	1,5 $\pm$ 0,3 b	1,0 $\pm$ 0,1 b	2,7 $\pm$ 0,3 c
некл. <i>Ilumatobacteraceae</i>	1,4 $\pm$ 0,4 b	2,1 $\pm$ 0,6 c	2,0 $\pm$ 0,2 c	0,7 $\pm$ 0,1 a
некл. <i>Betaproteobacteria</i>	0,9 $\pm$ 0,4 a	1,8 $\pm$ 0,7 b	1,7 $\pm$ 0,4 b	0,9 $\pm$ 0,1 a
некл. <i>Micromonosporaceae</i>	1,4 $\pm$ 0,5 b	0,5 $\pm$ 0,1 a	1,6 $\pm$ 0,5 b	1,5 $\pm$ 0,2 b
некл. <i>Spartobacteria</i> gis	0,8 $\pm$ 0,3 b	0,1 $\pm$ 0,1 a	0,4 $\pm$ 0,1 ab	3,6 $\pm$ 0,6 c
некл. <i>Bacillota</i>	1,9 $\pm$ 0,6 b	0,9 $\pm$ 0,4 a	1,5 $\pm$ 0,4 b	0,6 $\pm$ 0,1 a
некл. <i>Intrasporangiaceae</i>	2,5 $\pm$ 1,3 b	1,1 $\pm$ 0,6 a	0,7 $\pm$ 0,2 a	0,4 $\pm$ 0,1 a
некл. <i>Bacillaceae</i>	0,6 $\pm$ 0,3 a	1,5 $\pm$ 0,2 b	1,6 $\pm$ 0,3 b	0,5 $\pm$ 0,1 a
некл. <i>Myxococcales</i>	1,0 $\pm$ 0,4 a	0,8 $\pm$ 0,3 a	1,6 $\pm$ 0,4 b	0,9 $\pm$ 0,1 a
некл. <i>Iamiaeae</i>	0,5 $\pm$ 0,1 a	1,1 $\pm$ 0,2 b	1,0 $\pm$ 0,1 b	1,0 $\pm$ 0,1 b
некл. <i>Thermoleophilia</i>	0,8 $\pm$ 0,2 ab	1,1 $\pm$ 0,2 c	1,0 $\pm$ 0,1 bc	0,7 $\pm$ 0,1 a

Примечание.

*«некл.» обозначает «неклассифицированные».

Внесение минеральных удобрений немного, но статистически значимо снизило величину интегральных индексов Шеннона и Симпсона, несколько повысив связанный с последним индекс доминирования (табл. 11).

Таблица 11

Индексы α -биоразнообразия бактериобиома почвы ризосферы растений томата (среднее по всем участкам $\pm$ стандартное отклонение, $n = 12$ для каждого варианта опыта)

Индекс	Удобрение		Величина p
	Контроль	NPK	
Число ОТЕ	2639 $\pm$ 302	2437 $\pm$ 450	0,101
Као-1	3862 $\pm$ 337	3680 $\pm$ 557	0,211
Симпсона (S)	0,996 $\pm$ 0,001	0,995 $\pm$ 0,002	0,041
Шеннона	6,72 $\pm$ 0,18	6,58 $\pm$ 0,25	0,018
Выравненность	0,32 $\pm$ 0,05	0,30 $\pm$ 0,04	0,135
Равномерность	0,85 $\pm$ 0,02	0,85 $\pm$ 0,02	0,079
Доминирование (1-S)	0,004 $\pm$ 0,001	0,005 $\pm$ 0,002	0,039
Бергер-Паркера	0,032 $\pm$ 0,01	0,039 $\pm$ 0,01	0,080

По всем рассчитанным индексам α -биоразнообразия выявлены различия между некоторыми участками (табл. 12); чаще всего отличия были между участком с наибольшим содержанием органического углерода и доступных растениям форм фосфора, кальция и магния (участок У-3, см. табл. 1) и другими участками.

Таблица 12

Индексы α -биоразнообразия бактериобиома почвы ризосферы растений томата (среднее по всем вариантам опыта для каждого участка $\pm$ стандартное отклонение, $n = 6$)

Показатель	Опытный участок			
	У-1	У-2	У-3	У-4
Число ОТЕ	2573 $\pm$ 508 ab*	2131 $\pm$ 152 a	2780 $\pm$ 191 ab	2668 $\pm$ 293 b
Као-1	3812 $\pm$ 554 b	3266 $\pm$ 214 a	4120 $\pm$ 258 b	3887 $\pm$ 288 b
Симпсона (S)	0,995 $\pm$ 0,002 a	0,994 $\pm$ 0,001 a	0,997 $\pm$ 0,000 b	0,995 $\pm$ 0,000 a
Шеннона	6,62 $\pm$ 0,25 b	6,46 $\pm$ 0,14 a	6,93 $\pm$ 0,04 c	6,58 $\pm$ 0,05 a
Выравненность	0,30 $\pm$ 0,03 a	0,30 $\pm$ 0,02 a	0,37 $\pm$ 0,03 b	0,27 $\pm$ 0,02 a
Равномерность	0,85 $\pm$ 0,01 a	0,84 $\pm$ 0,01 a	0,88 $\pm$ 0,01 b	0,84 $\pm$ 0,01 a
Доминирование (1-S)	0,005 $\pm$ 0,002 b	0,006 $\pm$ 0,001 b	0,003 $\pm$ 0,000 a	0,005 $\pm$ 0,000 b
Бергер-Паркера	0,041 $\pm$ 0,015 b	0,039 $\pm$ 0,010 b	0,023 $\pm$ 0,090 a	0,038 $\pm$ 0,002 b

Примечание.

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

Взаимосвязь свойств почвы по окончании опыта и разнообразия бактериобиома ризосферы томата. Как отмечено выше, фактор «опытный участок» вносил значительный вклад в дисперсию относительного обилия последовательностей бактериальных таксонов разного уровня. Двухблочный анализ ковариации изученных переменных был проведен путем экстракции новых переменных (на основе максимизации ковариации) и регрессии значений этих новых переменных между блоком 1 и блоком 2 методом **частных наименьших квадратов (ЧНК)**, используя в качестве первого блока почвенные свойства по окончании опыта и продукционные характеристики растений томата, а в качестве второго блока – относительное обилие таксонов. Результаты, полученные для типов и родов бактерий, представлены на рисунке 1: расположение участков, представленное на панелях А и Б, типично и для других таксонов.

Осевые нагрузки, т.е. коэффициенты корреляции исходных переменных с выделенными осями, максимизирующими ковариацию, представлены на рисунке 1, В и Г. Приблизительно половина доминантных типов бактерий в почве ризосферы расположена ближе к продукционным свойствам томатов; оставшаяся половина находится ближе к почвенным свойствам (см. рис. 1, В). Заметим, что здесь проанализированы и представлены свойства почвы, отобранной по окончании опыта. Расположение родов бактерий в плоскости первых двух осей, совместно отвечающих за 78% общей ковариации, тяготеет больше к продукционным характеристикам растений томата (см. рис 1, Г)

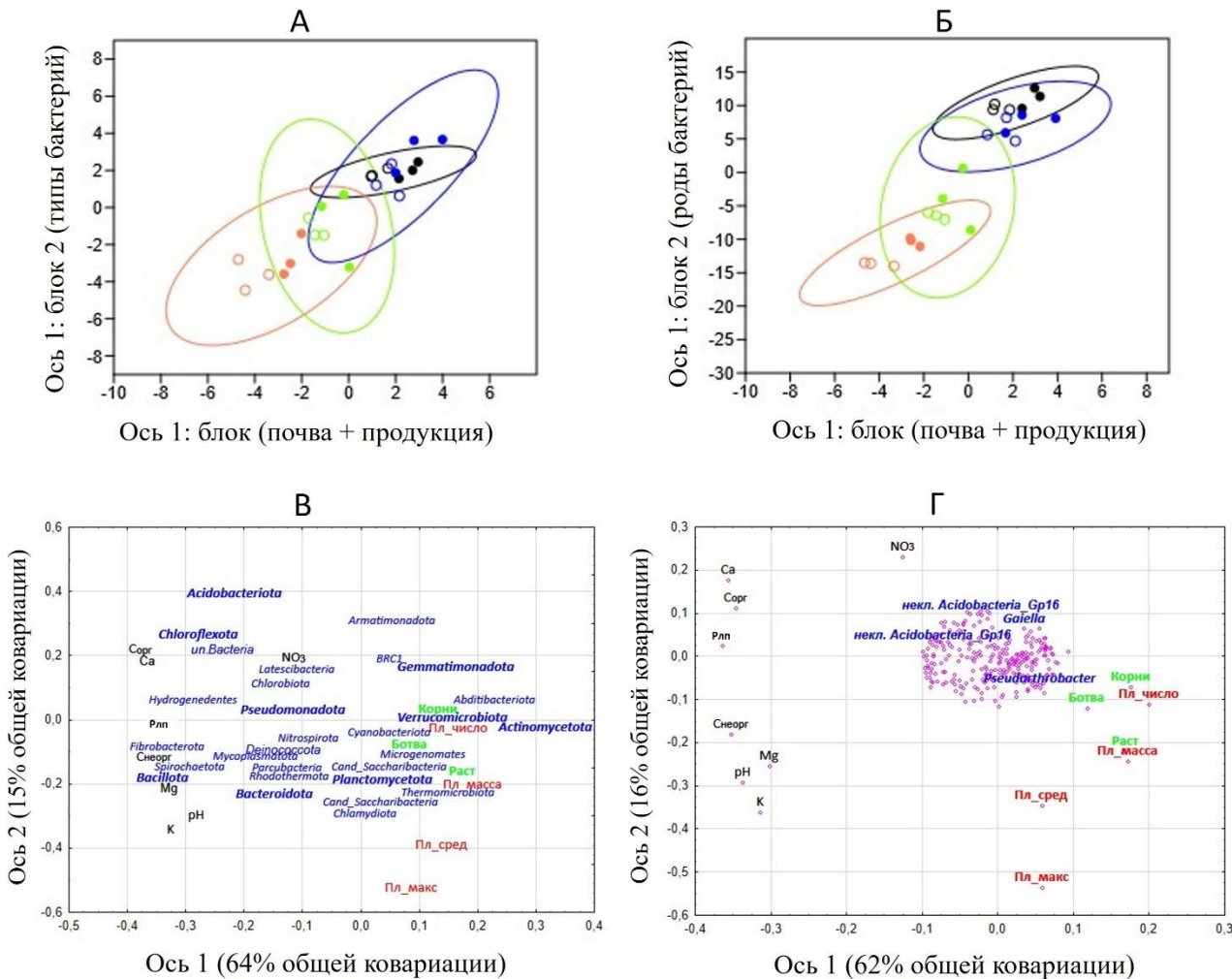


Рисунок 1. Расположение образцов почвы в плоскости блока 1 и блока 2 первой оси двухблокового метода частных наименьших квадратов (А – типы, Б – роды) и расположение переменных в плоскости первых двух осей (В – типы, Г – роды). Обозначения: $C_{орг}$ и $C_{неорг}$ – содержание органического и неорганического углерода в почве; $P_{лп}$ – легкоподвижного фосфора; К, Са и Mg – обменных калия, кальция и магния. Открытые кружки обозначают вариант без удобрений (Контроль). Жирным шрифтом обозначены доминантные таксоны. На графике Г подписаны названия основных доминантов (с относительным обилием последовательностей более 3%), а облако сиреневых точек обозначает расположение всех остальных родов бактерий. Эллипсы ограничивают плотность 95% вероятности.

Результаты анализа индексов α -биоразнообразия методом двухблокового ЧНК представлены на рисунке 2; значения блока 2 не сильно варьируют между образцами, а основное варьирование идет по оси 1. Расположение исходных переменных, т.е. переменных анализа, в плоскости первых двух осей, довольно четко показывает положительную корреляцию индексов доминирования и Бергер-Паркера с продукционными характеристикам растений и содержанием нитратного азота в почве, а индексов, характеризующих выравненность, равномерность, а также индексы Шеннона и Симпсона – с почвенными свойствами. Интересно, что ось 1 отвечает практически за всю ковариацию исходных переменных.

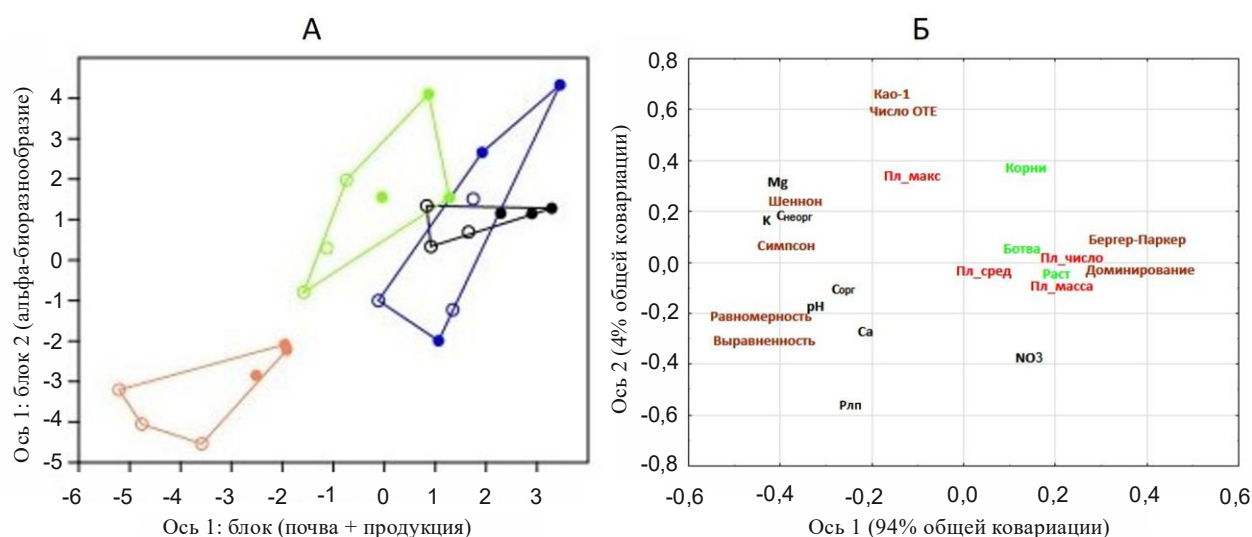


Рисунок 2. Расположение образцов почвы в плоскости блока 1 и блока 2 первой оси двухблочного метода частных наименьших квадратов (А) и расположение переменных в плоскости первых двух осей (Б). Обозначения: $C_{орг}$ и $C_{неорг}$ – содержание органического и неорганического углерода в почве; $P_{лп}$ – легкоподвижного фосфора; К, Са и Mg – обменных калия, кальция и магния.

ОБСУЖДЕНИЕ

Продукция томата. Средний по всем участкам и вариантам опыта урожай плодов томата составил $2,2 \pm 0,9$ кг на одно растение на делянке площадью $0,25 \text{ м}^2$, что эквивалентно $8,8 \text{ кг/м}^2$ или 88 т/га . Это существенно выше, чем средняя по всем хозяйствам страны урожайность в 2023 г., составившая $34,8 \text{ т/га}$ (FAOSTAT ..., 2024). Полученный в этом опыте урожай сравним с таковым в условиях открытого грунта в Китае (провинция Нинся, Ningxia Province, China), где получили 65 т/га в варианте без удобрения и $79\text{--}89 \text{ т/га}$ в вариантах с внесением минеральных удобрений, но в значительно больших дозах, а именно от 150 до 375 кг N/га (Mao et al., 2024). И в других странах в полевых опытах с внесением NPK как наименьшую часто используют дозу в 150 кг N/га , например, в Италии (Nasuelli et al., 2023; Novello et al., 2024). В нашем опыте в варианте без внесения удобрений урожайность плодов составила $1,6 \pm 0,6$ кг на одно растение с делянки площадью $0,25 \text{ м}^2$, что эквивалентно $6,4 \text{ кг/м}^2$ или 64 т/га . Эта урожайность томата близка к таковой (61 т/га) в условиях Поволжья в открытом грунте без удобрений (Вознесенская и др., 2024).

Как и ожидалось, внесение минеральных удобрений значительно (в среднем по всем участкам в 1,8 раза, см. табл. 4) повысило продуктивность томата, обеспечив в три раза (см. табл. 3) больший вклад в дисперсию этого основного показателя по сравнению с вкладом фактора «опытный участок». Интересным представляется отсутствие влияния удобрений на среднюю и максимальную массу плодов, которая является важным потребительским показателем. Размер плода зависит от числа клеток, которое увеличивается в течение $12\text{--}25$ дней после распускания цветка (Bertin et al., 2009), и размера клеток: эти свойства в значительной степени определены генетически (Takisawa et al., 2021). Поскольку мы использовали только один сорт, то последний фактор не мог влиять. Доза вносимых удобрений и густота стояния растений были на всех участках одинаковыми, поэтому и от этих факторов (Шетов и др., 2024) максимальная и средняя масса плода тоже не зависели. Известно, что размер плода увеличивается вплоть до начала его созревания, а его увеличение во второй половине этого периода сильно зависит от температуры (Takahashi et al., 2025). Поскольку на максимальную массу плода сильно влиял фактор «опытный участок» (вклад этого фактора в дисперсию максимальной массы был 78%, табл. 3), можно предположить, что варьирование солнечной радиации, как общей, так и фотосинтетически активной, определило максимальную массу плодов на каждом участке. Поскольку опыт проводили в открытых полевых условиях на удаленных друг от друга участках, то отсутствие данных о радиации и осадках (как, впрочем, и во многих других исследованиях), связанное с отсутствием соответствующих измерительных приборов, является недостатком нашего исследования, ограничивая возможность интерпретации результатов. Что касается массы корней (которая варьировала под действием обоих факторов, но больше в связи с фактором «опытный участок», чем в связи с внесением удобрений – 50 vs. 22% , см. табл. 3), то ее, возможно, в большей степени, чем

удобрения, определяло варьирование по участкам осадков. Поскольку корневая система имеет важное значение для формирования микробиома ризосферной почвы (Zhalnina et al., 2018; Park et al., 2023; Aгаџо et al., 2025), понимание причин ее варьирования необходимо для разработки агротехнологий с использованием направленной модификации бактериобиома, в частности, и микробиома, в целом. Основным инструментом, которым растение регулирует разнообразие микробиома своей ризосферы, являются корневые выделения и корневой опад (Zhalnina et al., 2018), количество которых, вероятно, тем больше, чем больше масса корней. Можно предположить, что стимулирование продукционного процесса растений удобрениями, стимулирует и рост подземной фитомассы, изменяя количество и качество корневых выделений, что приводит к сдвигам в составе и структуре бактериобиома.

Мы далеки от того, чтобы утверждать, что повышение продуктивности томата при внесении минеральных удобрений является новым фактом. Однако считаем нужным подчеркнуть, что выявление этого факта на фоне разных погодно-эдафических условий участков разной локализации позволяет распространить результаты на более широкий диапазон не только погодных (как при классическом требовании проведения полевых опытов минимум три года подряд), так и эдафических условий (например, Наумова и др., 2024). То есть, включение разнообразия местоположения опытных участков в проведение микрополевых агрохимических опытов – подобно полномасштабным полевым опытам, закладывавшихся по всей территории СССР в 1970–1980-х годах, некоторые из которых сохранились до сих пор (Мамбетов, 2015) – позволяет а) значительно сократить длительность исследования и б) расширить диапазон охватываемых условий. Такой методологический подход, т.е. замену временного градиента пространственным, давно используют в агрохимических исследованиях (Титлянова и др., 1988).

Бактериобиом почвы ризосферы томата. Сильное доминирование по относительному обилию (37% в среднем по всем вариантам опыта) последовательностей *Actinomyces* неудивительно, как для агросерых почв (Beule, Karlovsky, 2021; Qiu et al., 2021), так и для почв под томатом (Novello et al., 2024). В нашем опыте под влиянием внесения NPK обилие *Actinomyces* увеличилось (в 1,15 раза): это согласуется с результатами опыта с севооборотом, включающим картофель (т.е. паслёновую культуру), выявившими значительное повышение доли последовательностей *Actinomyces* – как и в нашем случае, также главного доминанта бактериобиома – при внесении NPK (Francioli et al., 2016). При этом в обоих исследованиях обилие *Acidobacteriota* уменьшилось (в нашем случае в 1,25 раза), что свидетельствует о чувствительности хотя бы одного из этих доминантных типов (подчеркнем, что речь идет о процентах) к прямому и/или опосредованному растениями действию удобрений (напомним, удобрения вносили раз в две недели в течение вегетационного периода).

Помимо типов бактерий, внесение минеральных удобрений повлияло и на обилие таксонов других уровней, в частности, на обилие более двух сотен родов, из которых шесть были доминантными. То есть, подавляющее большинство родов бактерий, изменивших свое относительное обилие под воздействием удобрений, было минорными или редкими, а собственно размер воздействия этого фактора на них (в единицах относительного обилия значительно меньше 0,1%) вряд ли можно считать экологически и агрономически значимым. Что касается основного доминантного рода *Pseudarthrobacter*, то его доминирующее положение в бактериобиоме исследованной почвы и заметное увеличение присутствия в вариантах опыта с внесением удобрений согласуется со способностью бактерий этого рода адаптироваться к условиям окружающей среды (González et al., 2025). Заметим, что увеличение обилия последовательностей *Pseudarthrobacter* при внесении удобрений выявлено и другими исследователями (Upadhyay et al., 2024). Недавно показано, что *Pseudarthrobacter* является одним из ключевых эндофитов корней томата (Fagnano et al., 2025), что может говорить о длительной взаимосвязи между растением-хозяином и бактерией-эндофитом, а также позволяет сделать вывод, что увеличение присутствия этих бактерий, выявленное в нашем опыте при внесении минеральных удобрений, способствовало росту и развитию растений томата. Примечательно, что на одном из участков проведения этого опыта был дополнительно проанализирован и бактериобиом корней томата; хотя *Pseudarthrobacter* sp. являлся основным доминантом в почве ризосферы с 3,6% обилия, тем не менее, в корнях его не выявили (Naumova et al., 2022).

Корни растений томата выделяют специализированные метаболиты, в частности, стероидные сапонины, которые влияют на структуру бактериобиома ризосферы (Sugiyama, 2021; Nakayasu et al., 2023a). Например, α -томатин увеличивает присутствие бактерий рода *Sphingobium* (Nakayasu et al., 2023b). Этот род выявили в ризосфере томата и другие исследователи (Антонов и др., 2025). В нашем исследовании обнаружено всего пять ОТЕ, относящихся к этому роду, относительное обилие последовательностей которого в среднем по всем участкам и вариантам удобрения составило $0,25 \pm 0,1\%$. Фактор «опытный участок» оказал влияние ($p=0,027$) на относительное обилие

Sphingobium-специфичных последовательностей: оно было наименьшим (0,8%) на участке с наименьшей массой корней (24 г/растение). Этот результат согласуется с установленной взаимосвязью между томатином и бактериями рода *Sphingobium*, поскольку выделение томатина корнями, вероятнее всего, пропорционально их массе. Однако по всем участкам корреляция оказалась статистически незначимой ($R_s=0,39$).

Внесение удобрений лишь немного снизило α -биоразнообразие бактериобиома (в среднем по всем опытным участкам индекс Шеннона с 6,72 до 6,58, при увеличении индекса доминирования Симпсона с 0,004 до 0,005, см. табл. 11). Подчеркнем, что влияние внесения минеральных удобрений на α -биоразнообразие ризосферного бактериобиома неоднозначно: опубликованы результаты как о его снижении (Novello et al., 2024), так и о повышении (Uradhyay et al., 2024) при внесении минеральных удобрений. Выявленная приуроченность индексов доминирования к продукционным показателям растений томата свидетельствует, вероятнее всего, что корневые выделения более продуктивных растений своим количеством и/или качеством благоприятствуют развитию некоторых бактерий, увеличивая их доминирование в бактериобиоме. Так, внесение в почву глюкозы повышало относительное обилие определенных бактерий в лабораторном опыте, моделирующем поступление корневых выделений (Falcini et al., 2003). Поскольку продукционные показатели в этом опыте связаны с внесением минеральных удобрений, то этот результат, как и увеличение относительного обилия *Pseudarthrobacter*, говорит о возможности агрономически благоприятной модификации бактериобиома ризосферы путем манипулирования удобрениями и, весьма вероятно, их дозами. Заслуживает внимания и приуроченность индексов выравненности и равномерности бактериобиома к основным почвенным свойствам, а именно pH и содержанию органического углерода (см. рис. 2): это может отражать занятость всех доступных в почве экологических ниш для бактерий (подавляющее большинство которых в почве являются хемоорганотрофами, особенно в ризосфере). Интересной представляется и чувствительность таких интегральных (т.е. отражающих и состав и структуру бактериобиома) индексов α -биоразнообразия как индексы Шеннона и Симпсона к содержанию доступных щелочноземельных элементов и неорганического углерода; вероятно, что эти свойства почв расширяют доступное бактериям пространство возможностей.

Визуализация результатов, полученных методом двухблокового ЧНК, как и дисперсионный анализ, четко демонстрирует большее (по сравнению с внесением минеральных удобрений) влияние свойств опытных участков на относительное обилие таксонов разных иерархических уровней, что показано на примере типов и родов бактерий. Это свидетельствует о контекстно-экологическом характере формирования и поддержания структуры ризосферного бактериобиома, т.е. зависимости последнего от конкретного сочетания эдафических, погодных, биотических и антропогенных факторов. Такая контекстность может иметь заметные последствия, например, в плане различного потенциального влияния стимулирующих рост растений штаммов бактерий, и т.п.

При изучении бактерий в прикорневой зоне томата методом культивирования, доминирующими оказались такие виды как *Acinetobacter Iwofii* и *Pseudomonas pseudoalcaligenes* (Алексеева, Потатуркина-Нестерова, 2014). В нашем исследовании выявлено 14 ОТЕ *Pseudomonas*, при этом только одна из них классифицирована до вида (*Pseudomonas peli*). Однако относительное обилие последовательностей этой бактерии в нашем исследовании составило сотые доли процента и меньше, а всего рода 0,5% в среднем по всем участкам. Что касается *Acinetobacter*, то в нашем исследовании выявлено их пять ОТЕ, из которых две классифицированных до вида (*Acinetobacter calcoaceticus* и *Acinetobacter baumannii*), и также с практически ничтожным (0,002%) обилием всего рода в среднем по участкам. Несмотря на известные серьезные методологические расхождения методов культивирования и метагеномных, а также и агрономических контекстов нашего опыта и опыта Алексеевой и Потатуркиной-Нестеровой (2014), в нашем исследовании столь малозаметное (т.е. отнюдь не на доминантных позициях) присутствие таких довольно широко встречающихся и хорошо изученных бактерий (следовательно, и хорошо представленных в базах данных по генам 16S) как *Pseudomonas* и *Acinetobacter* несколько неожиданно.

Общие замечания. Бактериобиом ризосферы играет исключительно важную роль в обеспечении роста и здоровья растений (Luo et al., 2024), а информация об основных агентах бактериального сообщества приобретает в последние годы все большую актуальность для разработки новых агробιοтехнологий. Полученные в нашем опыте, проведенном по одинаковой схеме на удаленных друг от друга опытных участках агросерой почве, сведения о составе и структуре бактериобиома ризосферы томата, являются, пусть и небольшим, но важным вкладом в изучение бактериобиома овощных культур в открытом грунте в условиях юга Западной Сибири.

Такого рода исследования с неизбежностью будут расширять и детализировать связи с фенологической и погодной динамикой, почвенными свойствами, агротехникой, генетикой возделываемых растений и т.п. В перспективе, с удешевлением стоимости высокопроизводительного секвенирования, будет происходить переход от метабаркодинга к метагеномному секвенированию почвенной ДНК, позволяющему анализировать не только таксономический состав, но и определять гены, продукты которых определяют почвенный метаболизм.

Поскольку редкие последовательности и, следовательно, редкие бактерии, вряд ли могут влиять на агрономический и экологический контекст почвенной среды (Brown et al., 2015), то нами были приведены результаты только по доминантным таксонам (т.е. таксонам с относительным обилием более 1% от общего числа последовательностей в образце), несмотря на более обширные спектры кластеров ОТЕ, по относительному обилию которых выявлены различия при внесении удобрений и/или между участками.

Подчеркнем также, что в опыте использовали только один сорт томата – Зырянку; полученные результаты как по ризосферному бактериобиому, так и по продукционным особенностям растений, относятся к этому сорту. Гетерогенность сортов по продукционным характеристикам и биохимическим свойствам растений может быть достаточно велика (Ierna et al., 2022; Nantongo et al., 2023). Учитывая огромное мировое разнообразие сортов томата – более 5000 (Food ..., 2023), учёт сортовой специфики имеет важное значение, как в проводимых исследованиях, так и в практическом растениеводстве.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выращивание томатов требует больших площадей достаточно плодородных почв. С потеплением климата и удлинением безморозного периода на юге Западной Сибири мелко- и среднемасштабное производство томатов в открытом грунте выглядит перспективным даже с использованием небольших доз минеральных удобрений. Понимание и учёт влияния удобрений и их доз на агромикробиом и продукционные возможности сельскохозяйственных культур будет способствовать поддержанию здоровья почвы и растений, а, следовательно, и качества растительной продукции.

Бактериобиом ризосферы является динамичным и варьирует под действием разных факторов, в том числе и внесения минеральных удобрений. Это свидетельствует о возможности целенаправленной модификации бактериобиома ризосферы в частности и агромикробиома в целом в более благоприятную сторону для роста и развития растений. Разработка таких технологий должна быть основана на детальном изучении компонентов агромикробиома в зависимости от погодных и фенологических условий, видов, форм и доз удобрений методами с большей видовой разрешающей способностью, чем 16S-метабаркодинг.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность Галине Александровне Бугровской и Анастасии Анатольевне Крыловой, ведущим инженерам лаборатории агрохимии ИПА СО РАН, за помощь в проведении полевых и лабораторно-аналитических работ. Авторы признательны Юрию Валентиновичу Фотеву, кандидату сельскохозяйственных наук, старшему научному сотруднику лаборатории интродукции пищевых растений Центрального Сибирского ботанического сада (г. Новосибирск), за любезно предоставленную рассаду томата для проведения опыта.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № 121031700309-1). Часть исследований (16S метабаркодинг) была поддержана в рамках государственного задания ИХБФМ СО РАН (проект № 125012300656-5).

ЛИТЕРАТУРА

- Алексеева А.С., Потатуркина-Нестерова Н.И. Характеристика видового состава микробиоценоза прикорневой зоны *Lycopersicon esculentum* Mill // Ульяновский медико-биологический журнал. 2014. № 4. С. 129–132.
- Антонов А.А., Ванькова А.А., Баранова Е.Н., Куренина Л.В., Платонова Е.В. Структура бактериального сообщества ризосферы трансгенных растений томата (*Solanum lycopersicum* L.) // Теоретическая и прикладная экология. 2025. № 1. С. 151–157. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2024-4-151-157>

- Вознесенская Т.Ю., Можарова И.П., Трифонова А. В., Волкова М.А. Влияние регулятора роста растений Фитактив Экстра на урожайность и качество томата в условиях Поволжья // Плодородие. 2024. № 5. С. 55–59. <https://doi.org/10.25680/19948603.2024.140.12>
- 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.
- Мамбетов К.Б. Влияние удобрений на накопление сухого вещества озимой пшеницей в севообороте на сероземно-луговых почвах Чуйской долины // Вестник Кыргызского национального аграрного университета им. К.И. Скрябина. 2015. № 1(33). С. 111–114.
- Минеев В.Г. Агрохимия: учебник. 3-е изд. Москва: Издательство Моск. ун-та; Наука, 2006. 720 с.
- 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. с268. <https://doi.org/10.31251/pos.v7i2.268>
- Практикум по агрохимии. 2-е издание, переработанное и дополненное / Под ред. академика РАСХН В.Г. Минеева. Москва: Издательство МГУ, 2001. 689 с.
- Семенов М.С. Метабаркодинг и метагеномика в почвенно-экологических исследованиях: успехи, проблемы и возможности // Журнал общей биологии. 2019. Том 80. № 6. С. 403–417. <https://doi.org/10.1134/S004445961906006X>
- Титлянова А.А., Миронычева-Токарева Н.П., Наумова Н.Б. Круговорот углерода в травяных экосистемах при зарастании отвалов // Почвоведение. 1988. № 7. С. 164–174
- Уманская М.В., Горбунов М.Ю., Краснова Е.С., Тарасова Н.Г. Сравнительный анализ структуры сообщества цианобактерий участка равнинного водохранилища по результатам микроскопического учета и 16s-метабаркодирования // Биосфера. 2023. Том 15. № 3. С. 246–260. <https://doi.org/10.24855/biosfera.v15i3.822>
- Шетов А.Х., Ахундзада М.Ш., Шибзухова З.С., Шибзухов З.С. Продуктивность плодов томата в зависимости от густоты стояния и доз минерального удобрения // Сельскохозяйственное землепользование и продовольственная безопасность: X Международная научно-практическая конференция, посвященная памяти Заслуженного деятеля науки РФ, КБР, Республики Адыгея, профессора Б.Х. Фиапшева (Нальчик, 22 марта 2024 г.). Нальчик: ФГБОУ ВО Кабардино-Балкарский ГАУ, 2024. Часть I. С. 156–160.
- Afridi M.S., Fakhar A., Kumar A., Ali S., Medeiros F.H.V., Muneer M.A., Ali H., Saleem M. Harnessing microbial multitrophic interactions for rhizosphere microbiome engineering // Microbiological Research. 2022. Vol. 265. Art. 127199. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2022.127199>
- Araujo A.S.F., Pereira A.P.A., de Medeiros E.V., Mendes L.W. Root architecture and the rhizosphere microbiome: Shaping sustainable agriculture // Plant Science: an international journal of experimental plant biology. 2025. Vol. 359. Art. 112599. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2025.112599>
- Barillot C.D.C., Sarde C.O., Bert V. et al. A standardized method for the sampling of rhizosphere and rhizoplane soil bacteria associated to a herbaceous root system // Annals of Microbiology. 2013. Vol. 63. P. 471–476. <https://doi.org/10.1007/s13213-012-0491-y>
- Berendsen R.L., Pieterse C.M., Bakker P.A. The rhizosphere microbiome and plant health // Trends in Plant Science. 2012. Vol. 17. No. 8. P. 478–486. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2012.04.001>
- Bertin N., Causse M., Brunel B., Tricon D., Genard M. Identification of growth processes involved in QTLs for tomato fruit size and composition // Journal of Experimental Botany. 2009. Vol. 60. P. 237–248. <https://doi.org/10.1093/jxb/ern281>
- Beule L., Karlovsky P. Tree rows in temperate agroforestry croplands alter the composition of soil bacterial communities // PLoS ONE. 2021. Vol.16. No. 2. e0246919. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0246919>
- Brown S.P., Veach A.M., Rigdon-Huss A.R., Grond K., Lickteig S.K., Lothamer K., Oliver A.K., Jumpponen A. Scraping the bottom of the barrel: are rare high throughput sequences artifacts? // Fungal Ecology. 2015. Vol. 13. P. 221–225. <https://doi.org/10.1016/j.funeco.2014.08.006>
- Chen W., Modi D., Picot A. Soil and Phytomicrobiome for Plant Disease Suppression and Management under Climate Change: A Review // Plants. 2023. Vol. 12. No. 14. 2736. <https://doi.org/10.3390/plants12142736>
- Edgar R.C. Search and clustering orders of magnitude faster than BLAST // Bioinformatics. 2010. Vol. 26. No.19. P. 2460–2461. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btq461>
- Edgar R.C. UPARSE: highly accurate OTU sequences from microbial amplicon reads // Nature Methods. 2013. Vol. 10. No. 10. P. 996–998. <https://doi.org/10.1038/nmeth.2604>

- Edgar R.C. UNOISE2: Improved error-correction for Illumina 16S and ITS amplicon reads // BioRxiv. 2016a. P. 081257. <https://doi.org/10.1101/081257>
- Edgar R.C. SINTAX, a Simple Non-Bayesian Taxonomy Classifier for 16S and ITS Sequences // BioRxiv. 2016b. P. 074161. <https://doi.org/10.1101/074161>
- Fadrosh D.W. An improved dual-indexing approach for multiplexed 16S rRNA gene sequencing on the Illumina MiSeq platform // Microbiome. 2014. Vol. 2. No. 1. P. 6. <https://doi.org/10.1186/2049-2618-2-6>
- Fagnano F.M., Ventrino V., Pasolli E., Romano I., Ambrosino P., Pepe O. From microbiome to biostimulants: unlocking the potential of tomato root endophytes // BMC Plant Biology. 2025. Vol. 25. Art. 427. <https://doi.org/10.1186/s12870-025-06447-4>
- FAOSTAT. Data. Crops and livestock products, tomatoes. Food and Agriculture organization of the United Nations, 2024. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL> (дата обращения 24.12.2024).
- Francioli D., Schulz E., Lentendu G., Wubet T., Buscot F. and Reitz T Mineral vs. Organic Amendments: Microbial Community Structure, Activity and Abundance of Agriculturally Relevant Microbes Are Driven by Long-Term Fertilization Strategies // Frontiers in Microbiology. 2016. Vol. 7. Art. 1446. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.01446>
- González D., Bruna P., Contreras M.J., Leal K., Urrutia C.V., Núñez-Montero K., Barrientos L. Genome Mining of *Pseudarthrobacter* sp. So.54, a Rhizospheric Bacteria from *Colobanthus quitensis* Antarctic Plant // Biomolecules. 2025. Vol. 15. No. 4. P. 534. <https://doi.org/10.3390/biom15040534>
- Hammer O., Harper D.A.T., Ryan P.D. PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis // Palaeontologia Electronica. 2001. Vol. 4. P. 9.
- Hassan S., Sabreena, Pocza P., Ganai B.A., Almalki W.H., Gafur A., Sayyed R.Z. Environmental DNA Metabarcoding: A Novel Contrivance for Documenting Terrestrial Biodiversity // Biology. 2022. Vol. 11. No. 9. 1297. <https://doi.org/10.3390/biology11091297>
- International Fertilizer Association (IFA). Public Summary. Short-Term Fertilizer Outlook 2023–2024. December 2023. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.fertilizer.org/market-intelligence/ifa-stat/> (дата обращения 24.12.2024).
- Luo C., He Y., Chen Y. Rhizosphere microbiome regulation: Unlocking the potential for plant growth // Current Research in Microbiological Science. 2024. Vol. 8. Art. 100322. <https://doi.org/10.1016/j.crmicr.2024.100322>
- Mao X., Gu J., Wang F., Wang K., Liu R., Hong Y., Wang Y., Han F. Yield, Quality, and Nitrogen Leaching of Open-Field Tomato in Response to Different Nitrogen Application Measures in Northwestern China // Plants. 2024. Vol. 13. No. 7. Art. 924. <https://doi.org/10.3390/plants13070924>
- Nakayasu M., Takamatsu K., Yazaki K., Sugiyama A. Plant specialized metabolites in the rhizosphere of tomatoes: secretion and effects on microorganisms // Bioscience, Biotechnology and Biochemistry. 2023a. Vol. 87. No. 1. P. 13–20. <https://doi.org/10.1093/bbb/zbac181>
- Nakayasu M., Takamatsu K., Kanai K., Masuda S., Yamazaki S., Aoki Y., Shibata A., Suda W., Shirasu K., Yazaki K., Sugiyama A. Tomato root-associated *Sphingobium* harbors genes for catabolizing toxic steroidal glycoalkaloids // MBio. 2023b. Vol. 14. No. 5. e00599-23. <https://doi.org/10.1128/mbio.00599-23>
- Naumova N., Baturina O., Nechaeva T., Kabilov M. Root and Rhizosphere Microbiome of Tomato Plants Grown in the Open Field in the South of West Siberia under Mineral Fertilization // Horticulturae. 2022. Vol. 8. Art. 1051. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8111051>
- Novello G., Bona E., Nasuelli M., Massa N., Sudiro C., Campana D.C., Gorrasi S., Hochart M.L., Altissimo A., Vuolo F., Gamalero E. The Impact of Nitrogen-Fixing Bacteria-Based Biostimulant Alone or in Combination with Commercial Inoculum on Tomato Native Rhizosphere Microbiota and Production: An Open-Field Trial // Biology. 2024. Vol. 13. No. 6. Art. 400. <https://doi.org/10.3390/biology13060400>
- Oyedoh O.P., Yang W., Dhanasekaran D., Santoyo G., Glick B.R., Babalola O.O. Rare rhizo-Actinomycetes: A new source of agroactive metabolites // Biotechnology Advances. 2023. Vol. 67. Art. 108205. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2023.108205>
- Park I., Seo Y.S., Mannaa M. Recruitment of the rhizo-microbiome army: assembly determinants and engineering of the rhizosphere microbiome as a key to unlocking plant potential // Frontiers in Microbiology. 2023. Vol. 14. Art.1163832. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1163832>
- Pawlowski J., Bruce K., Panksep K., Aguirre F.I., Amalfitano S., Apothéloz-Perret-Gentil L., Baussant T., Bouchez A., Carugati L., Cermakova K., et al. Environmental DNA metabarcoding for benthic monitoring: A review of sediment sampling and DNA extraction methods // Science of the Total Environment. 2022. Vol. 818. Art. 151783. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151783>

- Qiu L., Zhang Q., Zhu H., Reich P.B., Banerjee S., van der Heijden M.G.A., Sadowsky M.J., Ishii S., Jia X., Shao M., Liu B., Jiao H., Li H., Wei X. Erosion reduces soil microbial diversity, network complexity and multifunctionality // The ISME Journal. 2021. Vol. 15. No. 8. P. 2474–2489. <https://doi.org/10.1038/s41396-021-00913-1>
- Rai S., Omar A.F., Rehan M., Al-Turki A., Sagar A., Ilyas N., Sayyed R.Z., Hasanuzzaman M. Crop microbiome: their role and advances in molecular and omic techniques for the sustenance of agriculture // Planta. 2022. Vol. 257. No. 2. P. 27. <https://doi.org/10.1007/s00425-022-04052-5>
- Raza M.M., Bebbler D.P. Climate change and plant pathogens // Current Opinion in Microbiology. 2022. Vol. 70. P. 102233. <https://doi.org/10.1016/j.mib.2022.102233>
- Shanmugavel D., Rusyn I., Solorza-Feria O., Kamaraj S.K. Sustainable SMART fertilizers in agriculture systems: A review on fundamentals to in-field applications // The Science of the Total Environment. 2023. Vol. 904. P. 166729. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166729>
- Singh A., Mazahar S., Chapadgaonkar S.S., Giri P., Shourie A. Phyto-microbiome to mitigate abiotic stress in crop plants // Frontiers in Microbiology. 2023. Vol. 14. P. 1210890. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1210890>
- Sugiyama A. Flavonoids and saponins in plant rhizospheres: roles, dynamics, and the potential for agriculture // Bioscience, biotechnology, and biochemistry. 2021. Vol. 85. No. 9. P. 1919–1931. <https://doi.org/10.1093/bbb/zbab106>
- Takahashi M., Kawasaki Y., Naito H., Lee U., Yoshi K. Fruit size prediction of tomato cultivars using machine learning algorithms // Frontiers in Plant Science. 2025. Vol. 16. Art.1516255. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1516255>
- Takisawa R., Nishida A., Maai E., Nishimura K., Nakano R., Nakazaki T. Identification of Genetic Factors Affecting Fruit Weight in the Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) Cultivar ‘Micro-Tom’ // The Horticulture Journal. 2021. Vol. 90. No. 2. P. 209–214. <https://doi.org/10.2503/hortj.UTD-252>
- United Nations: Global Issues. Population. 2023. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.un.org/en/global-issues/population#:~:text=The%20world%20population%20is%20projected,and%2010.4%20billion%20by%202100> (дата обращения 28.08.2025).
- Upadhyay P.K., Dey A., Singh V.K., Dwivedi B.S., Singh R.K., Rajanna G.A., Babu S., Rathore S.S., Shekhawat K., Rai P.K., Choudhury N.K., Budhlakoti N., Mishra D.C., Rai A., Singh A., Bhardwaj A.K., Shukla G. Changes in microbial community structure and yield responses with the use of nano-fertilizers of nitrogen and zinc in wheat–maize system // Scientific Reports. 2024. Vol. 14. No. 1. P. 1100. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-48951-3>
- Wang Q., Garrity G.M., Tiedje J.M., Cole J.R. Naïve Bayesian Classifier for Rapid Assignment of rRNA Sequences into the New Bacterial Taxonomy // Applied and Environmental Microbiology. 2007. Vol. 73. No.16. P. 5261–5267. <https://doi.org/10.1128/AEM.00062-07>
- 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. No. 1. P. 241–257. <https://doi.org/10.1007/s10661-010-1454-z>

Поступила в редакцию 17.09.2025

Принята 28.10.2025

Опубликована 30.10.2025

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@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2354-5065>

Нечаева Таисия Владимировна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории агрохимии ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск, Россия); taya_inbox.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4943-9439>

Батурина Ольга Анатольевна – младший научный сотрудник ЦКП «Геномика» ФГБУН Институт химической биологии и фундаментальной медицины СО РАН (г. Новосибирск, Россия); baturina@niboch.nsc.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4115-7592>

Кирпиков Александр Александрович – техник-лаборант лаборатории агрохимии ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск, Россия); aakirpikov@gmail.com

Савенков Олег Александрович – кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории агрохимии ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск, Россия); oleg.a.savenkov@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9088-285X>

Кабилев Марсель Расимович – кандидат биологических наук, руководитель ЦКП «Геномика» ФГБУН Институт химической биологии и фундаментальной медицины СО РАН (г. Новосибирск, Россия); kabilov@niboch.nsc.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2777-0833>

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.



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

Rhizosphere bacteriobiome and tomato production under mineral fertilization in the open field in the south of West Siberia

© 2025 N. B. Naumova ¹, T. V. Nechaeva ¹, O. A. Baturina ², A. A. Kirpikov¹, O. A. Savenkov ¹,
M. R. Kabilov ²

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

²Institute of Chemical Biology and Fundamental Medicine, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Lavrentieva, 8, Novosibirsk, Russia

The aim of the study was to investigate the effect of mineral fertilization on the production properties of tomato plants and diversity of their rhizosphere bacteriobiome along a gradient of soil-ecological properties on four experimental sites, located in the forest-steppe zone of West Siberia.

Location and time of the study. The microplot field experiment for growing tomato *Lycopersicon esculentum* Mill. Of Zyryanka cultivar was performed on four experimental sites with agrozems (Phaeozems) in the Novosibirsk Region in 2021. Two treatments each repeated three times were used: no fertilization (No) and mineral fertilization (NPK) at the rate of N60P60K60. The geographical coordinates of the experimental sites ranged 55°15'40 – 54°47'09 N and 83°31'42 – 82°37'56 E.

Methodology. The experiment was performed with the similar setup simultaneously on four experimental fields in order to substitute temporal gradient with a spatial one, which allowed to estimate the effect of weather and soil properties variation on the variables of interest in the study. Soil samples were collected prior to the start and at the completion of the experiment and analyzed for soil organic, nitrates, mobile phosphorus, exchangeable potassium, calcium and magnesium content, as well as pH. Air and soil temperature was recorded during the experiment. At the end of the experiment tomato fruit number and mass, as well as above – and below ground phytomass were determined on each plot. The composition and structure of the rhizosphere soil bacteriobiome was estimated by 16S-metabarcoding. Statistical analysis was performed by using analysis of variance, principal components extraction and two-blocks multiple regression by partial least squares with the help of Statistica v.13.1 and PAST v. 4.16.

Main results. Overall, tomato rhizosphere was found to have 7935 operational taxonomic units, the majority of them (more than 45% of species' richness) belonging to Pseudomonadota. The Actinomycetota phylum was the ultimate dominant in the sequence reads relative abundance with ≥33%. Other major dominants with relative abundance of >10% were Pseudomonadota, Bacillota and Acidobacteriota. Mineral fertilization increased Actinomycetota abundance by 15%. Some dominant genera changed increased (*Pseudarthrobacter*, *Streptomyces*), whereas the other (dominant genus-level clusters from *Acidobacteria* Gp6, *Hyphomicrobiales*, *Myxococcales* and *Iamiaceae*) decreased their relative abundance due to the NPK fertilization. Altogether, 252 of 880 genera detected in the study, had their abundance changed by NPK fertilization, but except six dominants, they were minor or rare. Although slightly, but fertilization decreased alpha-biodiversity indices of Shannon and Simpson, somewhat increasing Berger-Parker and D-Simpson indices. The latter tended to correlate positively with tomato production characteristics, whereas Shannon and Simpson tended to correlate with soil properties. As averaged over four experimental sites, mineral fertilization improved tomato production characteristics (fruit number and mass, above- and belowground phytomass) that showed no correlation with soil properties before the experiment.

Conclusions. Bacteriobiome of tomato rhizosphere soil, being a dynamic entity, can change due to the influence of various factors, including mineral fertilization at the moderate rate. This provides the potential for targeted modification of rhizosphere bacteriobiome in particular and agromicrobiome as a whole to benefit the growth and development of agricultural plants. With climate warming and increasing of the frost-free period in the south of West Siberia small- medium-size tomato production in the open field is perspective even under moderate fertilization. Understanding the effect of such fertilization on agromicrobiome and production properties of crops can help sustaining soils and crops health and hence the quality of produced yields.

Keywords: Phaeozem; mineral fertilization; tomato; 16S-metabarcoding; soil ecological conditions.

How to cite: Naumova N.B., Nechaeva T.V., Baturina O.A., Kirpikov A.A., Savenkov O.A., Kabilov M.R. Rhizosphere bacteriobiome and tomato production under mineral fertilization in the open field in the south of West Siberia. *The Journal of Soils and Environment*. 2025. 8(3). e336. DOI: [10.31251/pos.v8i3.336](https://doi.org/10.31251/pos.v8i3.336) (in Russian with English abstract).

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors are very thankful to Galina Aleksandrovna Bugrovskaya and Anastasiya Anatolyevna Krylova, both Leading Engineers in the Institute of Soil Science and Agrochemistry (SB RAS, Novosibirsk, Russia) for helping with the field work and carrying out laboratory analyses. The authors also thank very much Yury Valentinovich Fotev, Candidate of Agricultural Sciences, enior Researcher with the Laboratory of Food Plants Introduction of the Central Siberian Botanical Garden (SB RAS, Novosibirsk, Russia), who provided tomato plants for the experiment.

FUNDING

The study was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. 121031700309-1). Part of this work (16S metabarcoding) was supported by the Russian state-funded project for ICBFM SB RAS (No. 125012300656-5).

REFERENCES

- Alekseeva A.S., Potaturkina-Nesterova N.I. The characteristic species composition of microbiocenosis basal area *Lycopersicon esculentum* Mill. Ulyanovsk Medico-Biological Journal. 2014. No. 4. P. 129–132. (in Russian).
- Antonov A.A., Vankova A.A., Baranova E.N., Kurenina L.V., Platonova E.V. Transgenic tomato (*Solanum lycopersicum* L.) rhizosphere bacterial community structure. Theoretical and Applied Ecology. 2015. No. 1. P. 151–157. (in Russian). <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2024-4-151-157>
- Voznesenskaya T.U., Mozharova I.P., Trifonova A.V., Volkova M.A. The effect of plant growth regulator Phytactive Extra on tomato yield and quality in the Volga region. Plodorodie. 2024. No. 5. P. 55–59. (in Russian). <https://doi.org/10.25680/19948603.2024.140.12>
- 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).
- Mambetov K.B. Effect of fertilizers on the accumulation of dry matter by winter wheat in crop rotation on sierozem-meadow soils of the Chui Valley. Vestnik of the Kyrgyz national agrarian university K.I. Scriabin. 2015. No. 1(33). P. 111–114. (in Russian).
- Mineev V.G. Agrochemistry. 3rd ed. Moscow: Moscow Publishing House; Nauka Publ., 2006. 720 p. (in Russian).
- 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. The Journal of Soils and Environment. 2024. Vol. 7. No. 2. e268. (in Russian). <https://doi.org/10.31251/pos.v7i2.268>
- Agrochemistry Workshop. 2nd edition, revised and supplemented / V.G. Mineev (ed.). Moscow: Moscow State University Publishing House, 2001. 689 p. (in Russian).
- Semenov M.V. Metabarcoding and metagenomics in soil ecology research: achievements, challenges and prospects. Biology Bulletin Reviews. 2021. Vol. 11. No. 1. P. 40–53. <https://doi.org/10.1134/S2079086421010084>
- 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).
- Umanskaya M.V., Gorbunov M.Yu., Krasnova Ye.S., Tarasova N.G. Microscopic examination and 16s metabarcoding for comparative analysis of cyanobacteria community structure in a plainland reservoir. Biosfera. 2023. Vol. 15. No. 3. P. 246–260 (in Russian). <https://doi.org/10.24855/biosfera.v15i3.822>
- Shetov A.Kh., Akhundzada M.Sh., Shibzukhova Z.S., Shibzukhov Z.S. Productivity of tomato fruit depending on the density of standing and doses of mineral nutrition. In book: Agricultural land use and food security. X International scientific and practical conference dedicated to the memory of the Honored Scientist of the Russian Federation, the Kabardino-Balkarian Republic, the Republic of Adygea, Professor B.Kh. Fiapshev (Nalchik, 22 March, 2024). Nalchik: Kabardino-Balkarian SAU, 2024. Part I. P. 156–160. (in Russian).
- Afridi M.S., Fakhar A., Kumar A., Ali S., Medeiros F.H.V., Muneer M.A., Ali H., Saleem M. Harnessing microbial multitrophic interactions for rhizosphere microbiome engineering. Microbiological Research. 2022. Vol. 265. Art. 127199. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2022.127199>
- Araujo A.S.F., Pereira A.P.A., de Medeiros E.V., Mendes L.W. Root architecture and the rhizosphere microbiome: Shaping sustainable agriculture. Plant Science: an international journal of experimental plant biology. 2025. Vol. 359. Art. 112599. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2025.112599>

- Barillot C.D.C., Sarde C.O., Bert V. et al. A standardized method for the sampling of rhizosphere and rhizoplane soil bacteria associated to a herbaceous root system. *Annals of Microbiology*. 2013. Vol. 63. P. 471–476. <https://doi.org/10.1007/s13213-012-0491-y>
- Berendsen R.L., Pieterse C.M., Bakker P.A. The rhizosphere microbiome and plant health. *Trends in Plant Science*. 2012. Vol. 17. No. 8. P. 478–486. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2012.04.001>
- Bertin N., Causse M., Brunel B., Tricon D., Genard M. Identification of growth processes involved in QTLs for tomato fruit size and composition. *Journal of Experimental Botany*. 2009. Vol. 60. P. 237–248. <https://doi.org/10.1093/jxb/ern281>
- Beule L., Karlovsky P. Tree rows in temperate agroforestry croplands alter the composition of soil bacterial communities. *PLoS ONE*. 2021. Vol.16. No. 2. e0246919. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0246919>
- Brown S.P., Veach A.M., Rigdon-Huss A.R., Grond K., Lickteig S.K., Lothamer K., Oliver A.K., Jumpponen A. Scraping the bottom of the barrel: are rare high throughput sequences artifacts? *Fungal Ecology*. 2015. Vol. 13. P. 221–225. <https://doi.org/10.1016/j.funeco.2014.08.006>
- Chen W., Modi D., Picot A. Soil and Phytomicrobiome for Plant Disease Suppression and Management under Climate Change: A Review. *Plants*. 2023. Vol. 12. No. 14. 2736. <https://doi.org/10.3390/plants12142736>
- Edgar R.C. Search and clustering orders of magnitude faster than BLAST. *Bioinformatics*. 2010. Vol. 26. No.19. P. 2460–2461. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btq461>
- Edgar RC. UPARSE: highly accurate OTU sequences from microbial amplicon reads. *Nature Methods*. 2013. Vol. 10. No. 10. P. 996–998. <https://doi.org/10.1038/nmeth.2604>
- Edgar R.C. UNOISE2: Improved error-correction for Illumina 16S and ITS amplicon reads. *BioRxiv*. 2016a. P. 081257. <https://doi.org/10.1101/081257>
- Edgar R.C. SINTAX, a Simple Non-Bayesian Taxonomy Classifier for 16S and ITS Sequences. *BioRxiv*. 2016b. P. 074161. <https://doi.org/10.1101/074161>
- Fadrosh D.W. An improved dual-indexing approach for multiplexed 16S rRNA gene sequencing on the Illumina MiSeq platform. *Microbiome*. 2014. Vol. 2. No. 1. P. 6. <https://doi.org/10.1186/2049-2618-2-6>
- Fagnano F.M., Ventrino V., Pasolli E., Romano I., Ambrosino P., Pepe O. From microbiome to biostimulants: unlocking the potential of tomato root endophytes. *BMC Plant Biology*. 2025. Vol. 25. Art. 427. <https://doi.org/10.1186/s12870-025-06447-4>
- FAOSTAT. Data. Crops and livestock products, tomatoes. Food and Agriculture organization of the United Nations, 2024. [Electronic resource]. URL: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL> (accessed on 24.12.2024).
- Francioli D., Schulz E., Lentendu G., Wubet T., Buscot F. and Reitz T Mineral vs. Organic Amendments: Microbial Community Structure, Activity and Abundance of Agriculturally Relevant Microbes Are Driven by Long-Term Fertilization Strategies. *Frontiers in Microbiology*. 2016. Vol. 7. Art. 1446. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.01446>
- González D., Bruna P., Contreras M.J., Leal K., Urrutia C.V., Núñez-Montero K., Barrientos L. Genome Mining of *Pseudarthrobacter* sp. So.54, a Rhizospheric Bacteria from *Colobanthus quitensis* Antarctic Plant. *Biomolecules*. 2025. Vol. 15. No. 4. P. 534. <https://doi.org/10.3390/biom15040534>
- Hammer O., Harper D.A.T., Ryan P.D. PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. *Palaeontologia Electronica*. 2001. Vol. 4. P. 9.
- Hassan S., Sabreena, Pocza P., Ganai B.A., Almalki W.H., Gafur A., Sayyed R.Z. Environmental DNA Metabarcoding: A Novel Contrivance for Documenting Terrestrial Biodiversity. *Biology*. 2022. Vol. 11. No. 9. 1297. <https://doi.org/10.3390/biology11091297>
- International Fertilizer Association (IFA). Public Summary. Short-Term Fertilizer Outlook 2023–2024. December 2023. [Electronic resource]. URL: <https://www.fertilizer.org/market-intelligence/ifastat/> (accessed on 24.12.2024).
- Luo C., He Y., Chen Y. Rhizosphere microbiome regulation: Unlocking the potential for plant growth. *Current Research in Microbiological Science*. 2024. Vol. 8. Art. 100322. <https://doi.org/10.1016/j.crmicr.2024.100322>
- Mao X., Gu J., Wang F., Wang K., Liu R., Hong Y., Wang Y., Han F. Yield, Quality, and Nitrogen Leaching of Open-Field Tomato in Response to Different Nitrogen Application Measures in Northwestern China. *Plants*. 2024. Vol. 13. No. 7. Art. 924. <https://doi.org/10.3390/plants13070924>
- Nakayasu M., Takamatsu K., Yazaki K., Sugiyama A. Plant specialized metabolites in the rhizosphere of tomatoes: secretion and effects on microorganisms. *Bioscience, Biotechnology and Biochemistry*. 2023a. Vol. 87. No. 1. P. 13–20. <https://doi.org/10.1093/bbb/zbac181>

- Nakayasu M., Takamatsu K., Kanai K., Masuda S., Yamazaki S., Aoki Y., Shibata A., Suda W., Shirasu K., Yazaki K., Sugiyama A. Tomato root-associated *Sphingobium* harbors genes for catabolizing toxic steroidal glycoalkaloids. MBio 2023b. Vol. 14. No. 5. e00599-23. <https://doi.org/10.1128/mbio.00599-23>
- Naumova N., Baturina O., Nechaeva T., Kabilov M. Root and Rhizosphere Microbiome of Tomato Plants Grown in the Open Field in the South of West Siberia under Mineral Fertilization. Horticulturae. 2022. Vol. 8. Art. 1051. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8111051>
- Novello G., Bona E., Nasuelli M., Massa N., Sudiro C., Campana D.C., Gorrasi S., Hochart M.L., Altissimo A., Vuolo F., Gamalero E. The Impact of Nitrogen-Fixing Bacteria-Based Biostimulant Alone or in Combination with Commercial Inoculum on Tomato Native Rhizosphere Microbiota and Production: An Open-Field Trial. Biology. 2024. Vol. 13. No. 6. Art. 400. <https://doi.org/10.3390/biology13060400>
- Oyedoh O.P., Yang W., Dhanasekaran D., Santoyo G., Glick B.R., Babalola O.O. Rare rhizo-Actinomycetes: A new source of agroactive metabolites. Biotechnology Advances. 2023. Vol. 67. Art. 108205. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2023.108205>
- Park I., Seo Y.S., Manna M. Recruitment of the rhizo-microbiome army: assembly determinants and engineering of the rhizosphere microbiome as a key to unlocking plant potential. Frontiers in Microbiology. 2023. Vol. 14. Art.1163832. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1163832>
- Pawlowski J., Bruce K., Panksep K., Aguirre F.I., Amalfitano S., Apothéoz-Perret-Gentil L., Baussant T., Bouchez A., Carugati L., Cermakova K., et al. Environmental DNA metabarcoding for benthic monitoring: A review of sediment sampling and DNA extraction methods. Science of the Total Environment. 2022. Vol. 818. Art. 151783. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151783>
- Qiu L., Zhang Q., Zhu H., Reich P.B., Banerjee S., van der Heijden M.G.A., Sadowsky M.J., Ishii S., Jia X., Shao M., Liu B., Jiao H., Li H., Wei X. Erosion reduces soil microbial diversity, network complexity and multifunctionality. The ISME Journal. 2021. Vol. 15. No. 8. P. 2474–2489. <https://doi.org/10.1038/s41396-021-00913-1>
- Rai S., Omar A.F., Rehan M., Al-Turki A., Sagar A., Ilyas N., Sayyed R.Z., Hasanuzzaman M. Crop microbiome: their role and advances in molecular and omic techniques for the sustenance of agriculture. Planta. 2022. Vol. 257. No. 2. P. 27. <https://doi.org/10.1007/s00425-022-04052-5>
- Raza M.M., Bebber D.P. Climate change and plant pathogens. Current Opinion in Microbiology. 2022. Vol. 70. P. 102233. <https://doi.org/10.1016/j.mib.2022.102233>
- Shanmugavel D., Rusyn I., Solorza-Feria O., Kamaraj S.K. Sustainable SMART fertilizers in agriculture systems: A review on fundamentals to in-field applications. The Science of the Total Environment. 2023. Vol. 904. P. 166729. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166729>
- Singh A., Mazahar S., Chapadgaonkar S.S., Giri P., Shourie A. Phyto-microbiome to mitigate abiotic stress in crop plants. Frontiers in Microbiology. 2023. Vol. 14. P. 1210890. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1210890>
- Sugiyama A. Flavonoids and saponins in plant rhizospheres: roles, dynamics, and the potential for agriculture. Bioscience, biotechnology, and biochemistry. 2021. Vol. 85. No. 9. P. 1919–1931. <https://doi.org/10.1093/bbb/zbab106>
- Takahashi M., Kawasaki Y., Naito H., Lee U., Yoshi K. Fruit size prediction of tomato cultivars using machine learning algorithms. Frontiers in Plant Science. 2025. Vol. 16. Art.1516255. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1516255>
- Takisawa R., Nishida A., Maai E., Nishimura K., Nakano R., Nakazaki T. Identification of Genetic Factors Affecting Fruit Weight in the Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) Cultivar ‘Micro-Tom’. The Horticulture Journal. 2021. Vol. 90. No. 2. P. 209–214. <https://doi.org/10.2503/hortj.UTD-252>
- United Nations: Global Issues. Population. 2023. [Electronic resource]. URL: <https://www.un.org/en/global-issues/population#:~:text=The%20world%20population%20is%20projected,and%2010.4%20billion%20by%202100> (accessed on 28.08.2025).
- Upadhyay P.K., Dey A., Singh V.K., Dwivedi B.S., Singh R.K., Rajanna G.A., Babu S., Rathore S.S., Shekhawat K., Rai P.K., Choudhury N.K., Budhlakoti N., Mishra D.C., Rai A., Singh A., Bhardwaj A.K., Shukla G. Changes in microbial community structure and yield responses with the use of nano-fertilizers of nitrogen and zinc in wheat–maize system. Scientific Reports. 2024. Vol. 14. No. 1. P. 1100. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-48951-3>
- Wang Q., Garrity G.M., Tiedje J.M., Cole J.R. Naïve Bayesian Classifier for Rapid Assignment of rRNA Sequences into the New Bacterial Taxonomy. Applied and Environmental Microbiology. 2007. Vol. 73. No.16. P. 5261–5267. <https://doi.org/10.1128/AEM.00062-07>
- 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. No. 1. P. 241–257. <https://doi.org/10.1007/s10661-010-1454-z>

Received 17 September 2025

Accepted 28 October 2025

Published 30 October 2025

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@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2354-5065>

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); taya_@inbox.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4943-9439>

Olga A. Baturina – Junior Researcher in Genomics Core Facility of Institute of Chemical Biology and Fundamental Medicine, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); baturina@niboch.nsc.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4115-7592>

Aleksandr A. Kirpikov – Laboratory Technician in the Laboratory of Agrochemistry in the Institute of Soil Science and Agrochemistry, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); aakirpikov@gmail.com

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); oleg.a.savenkov@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9088-285X>

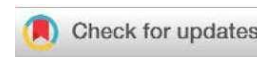
Marsel R. Kabilov – Candidate of Biological Science, Head of the Genomics Core Facility in the Institute of Chemical Biology and Fundamental Medicine, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); kabilov@niboch.nsc.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2777-0833>

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.v8i3.317>

Исторические этапы развития исследований в лаборатории географии и генезиса почв Института почвоведения и агрохимии СО РАН

© 2025 Н. А. Соколова , Б. А. Смоленцев 

ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, проспект Академика Лаврентьева, 8/2,
г. Новосибирск, 630090, Россия. E-mail: nasokolova30@yandex.ru

Лаборатория географии и генезиса почв Института почвоведения и агрохимии (ИПА) СО РАН является старейшей в составе Института. За более чем полувековой период ее существования масштабы и степень детальности исследований почв и почвенного покрова планомерно увеличивались. В начале работы лаборатории проведены обследования почвенного покрова основных земледельческих районов Западной Сибири, что послужило основой для составления в дальнейшем различных тематических мелкомасштабных карт юго-восточной части Западной Сибири, среднемасштабных почвенных карт ряда областей Сибири, а также серии листов Государственной почвенной карты СССР. Наряду с прикладными работами решались и фундаментальные проблемы специфики генезиса почв Сибири. На следующих этапах развития лаборатории география ее картографических работ постепенно расширялась; установлена специфика режимов и свойств почв Сибири разных таксономических групп. Участие в международных исследовательских программах и всесоюзных проектах заложило базу для развертывания масштабных исследований в различных природных зонах и областях. Последующие работы по качественной оценке почв послужили основой для разработки их классификации, теоретической основы для внедрения систем адаптивно-ландшафтного земледелия, исследований влияния антропогенных и климатических факторов на современный генезис и эволюцию почв. В последние десятилетия в лаборатории используются новейшие подходы и методы создания цифровых почвенных карт, геоинформационных систем и численного моделирования наряду с классическими исследованиями отдельных почвенных свойств.

Ключевые слова: география почв; генезис; эволюция; картография почв.

Цитирование: Соколова Н.А., Смоленцев Б.А. Исторические этапы развития исследований в лаборатории географии и генезиса почв Института почвоведения и агрохимии СО РАН // Почвы и окружающая среда. 2025. Том 8. № 3. e317. DOI: [10.31251/pos.v8i3.317](https://doi.org/10.31251/pos.v8i3.317)

Лаборатория географии и генезиса почв является старейшей в Институте почвоведения и агрохимии (ИПА) СО РАН. Она была образована в 1960 году наряду с лабораториями плодородия почв, почвенной микробиологии, физики, мелиорации и эрозии почв в составе Отдела почвоведения Биологического института (БИ) Сибирского отделения Академии наук СССР. В соответствии с постановлениями ГКНТ СССР от 26 июля 1968 г., а затем и Президиума АН СССР от 09 октября 1968 г. на базе Отдела почвоведения БИ СО АН СССР был создан Институт почвоведения и агрохимии СО АН СССР с размещением по адресу г. Новосибирск, ул. Советская, 18. Его директором назначен Ковалев Роман Викторович, возглавлявший одновременно лабораторию географии и генезиса почв до 1986 года. С 1987 по 2005 гг. лабораторией заведовал член-корреспондент РАН Ильяс Мамедович Гаджиев, с 2007 по 2024 гг. – к.б.н. Борис Анатольевич Смоленцев, а в настоящее время ею руководит к.б.н. Наталья Александровна Соколова.

Следует отметить, что за время функционирования лаборатории географии и генезиса почв в ней «выросли» и получили ученые степени и звания 2 члена-корреспондента РАН, 4 профессора, 8 докторов и 16 кандидатов биологических наук. Это, несомненно, свидетельствует о фундаментальности исследований и широчайших научных интересах коллектива лаборатории.

Еще до образования ИПА научными сотрудниками лаборатории (Ковалев Р.В., Гаджиев И.М., Волковинцер В.И., Хмелев В.А., Корсунов В.М., Рябова Т.Н.) была проведена большая работа по изучению почв Западной Сибири. В 1950-1960-х гг. основными направлениями исследований были инвентаризация почв юга Западной Сибири, разработка научных основ повышения плодородия, мелиорации, картография почв (рис. 1). Результатами этих работ стали многочисленные статьи в журналах и сборниках (Генезис почв ..., 1964; Ковалев и др., 1967), доклады на всесоюзных симпозиумах и конференциях, монография «Почвы Новосибирской области» (Ковалев и др., 1966).



Рисунок 1. В.И. Волковинцер во время исследований почв Горного Алтая, 1950-е гг. XX в. Фото из архива Почвенного музея ИПА СО РАН.

С организацией специализированного Института почвоведения и агрохимии круг интересов лаборатории расширяется, как в географическом отношении, так и в плане детализации исследований. Большой фактический материал был накоплен по качественному состоянию земельного фонда сельскохозяйственной зоны Западной Сибири, географическим закономерностям и основным чертам почвообразования, специфике почв Западно-Сибирской равнины и ее горного юго-восточного окаймления (Ковалев, Трофимов, 1968). В этот период подробно изучены фациальные особенности почвообразования в Горно-Алтайской автономной области, выделены темноцветные почвы парковых лиственничников (Ковалев, Хмелев, 1968), рассмотрены структура почвенного покрова и схема классификации, дана агрохимическая характеристика почв земледельческой зоны Горного Алтая (Ковалев и др., 1968). Результаты этих исследований обобщены в монографии «Почвы Горно-Алтайской автономной области» (1973).

Одновременно с этим направлением проводились масштабные исследования почвенного покрова южной тайги Западной Сибири, где были выделены дерново-подзолистые почвы со вторым гумусовым горизонтом (Ковалев, Гаджиев, 1968; Гаджиев, 1976) и подняты вопросы радиоуглеродного датирования органического вещества в этих почвах (Ковалев и др., 1972). Исследовались специфические черты процессов, формирующих профили глубокоподзоленных почв в черневой тайге Салаира (Корсунов, 1970; Ковалев и др., 1981) и в таежной зоне горного окаймления юго-восточной части Западной Сибири (Ковалев и др., 1974).

Р.В. Ковалев и И.М. Гаджиев приняли участие в составлении листов Государственной почвенной карты СССР М 1:1 000 000: «Тобольск» (1969 г.), «Колпашево» (1977 г.), «Тара» (1980 г.).

Помимо вышеупомянутых направлений, исследования лаборатории касались изучения генезиса засоленных и солонцеватых почв Обь-Иртышского междуречья, их географического распространения и функционирования, выделения мелиоративных категорий (Рябова, 1972).

Уже первые итоги исследований сотрудников лаборатории географии и генезиса почв позволили заявить о себе на международном уровне и участвовать наравне с Почвенным институтом им. В.В. Докучаева в проведении X Международного конгресса почвоведов (рис. 2) в 1974 г. (Путеводитель почвенной ..., 1974). Благодаря хорошо организованной и проведенной научной Западно-Сибирской почвенной экскурсии в ходе работы Конгресса, ИПА был включен в Международную Биологическую Программу по изучению круговорота углерода и азота в экосистемах, провозглашенную ЮНЕСКО в 1964 году. Результаты масштабных всесторонних катенарных исследований были представлены в двухтомной коллективной монографии «Структура, функционирование и эволюция системы биогеоценозов Барабы» (1974, 1976).



Рисунок 2. Лекция Р.В. Ковалева в ходе научной Западно-Сибирской почвенной экскурсии в Горном Алтае, 1974 г. Фото из архива Почвенного музея ИПА СО РАН.

Исследования лабораторией почвенного покрова степных районов юга Сибири, генезиса и функционирования засоленных почв позволили обосновать и спрогнозировать риски при реализации Проекта переброски стока сибирских рек в Среднюю Азию (Ковалев, Гаджиев, 1975; Курачев, Рябова, 1981).

С началом активного строительства БАМа, в 1974 году сразу по нескольким направлениям были организованы исследования почвенного покрова этой зоны (рис. 3) и возможностей ее сельскохозяйственного освоения (Ковалев и др., 1977а); результаты изучения генезиса почв Прибайкалья и Баргузинской котловины оформились позже в соответствующие монографии (Почвы зоны БАМ, 1979; Копосов, 1983; Почвы Баргузинской котловины, 1983). Расширение географии исследований выявило специфические черты почвообразования в зонах темнохвойных лесов (Ковалев и др., 1981б), тундровой и лесотундровой зонах (Ковалев и др., 1981а), способствовало выделению особых криоаридных почв Сибири (Волковинцер, 1978), которые на уровне типа были включены в отдел палево-метаморфических почв в новой Классификации и диагностике почв России 2004 г.



Рисунок 3. Сотрудники лаборатории географии почв на пароме во время исследований зоны БАМ. Фото из архива Почвенного музея ИПА СО РАН.

Масштабные работы в конце 1970-х – начале 80-х гг. по качественной оценке земельного фонда Сибири, факультетной специфике генезиса почв и структуры почвенного покрова отразились как в составлении почвенных карт отдельных районов исследований (Карта структуры ..., 1976; Почвенная карта ..., 1977), так и в вопросах классификации почв (Ковалев и др., 1977), производственной бонитировки почв и земель (Методические указания ..., 1979; Тюменцев и др., 1979). Интенсивное освоение сельскохозяйственных земель в разных природных зонах способствовало разработке проблем рационального размещения угодий (так называемого «очагового» земледелия), внедрению принципов охраны почв и экологизации производства (Особенности формирования ..., 1982; Ковалев, Гаджиев, 1977).

До конца 1980-х гг. основными направлениями работ в лаборатории были: изучение закономерностей пространственного распределения почв, механизмов их возникновения, формирования и эволюции; оценка последствий естественной и антропогенной трансформации почв и почвенного покрова и ее анализ; оценка эффективности сельскохозяйственного использования почв разных земельных угодий. При непосредственном научном руководстве и постоянном консультировании сотрудниками лаборатории (И.М. Гаджиев, В.М. Курачев, Хмелев В.А., Щербинин В.И.) ЗапСибГИПроземом проведена крупномасштабная инвентаризация почвенных ресурсов Новосибирской, Томской и Кемеровской областей. По результатам этой инвентаризации были откорректированы крупномасштабные почвенные карты совхозов и колхозов, обновлены и усовершенствованы системы земледелия.

В период с 1980 по 1990 гг. фундаментальные исследования почвообразовательных процессов генезиса и эволюции западносибирских почв позволили выявить специфические особенности регионального почвообразования (Генезис, эволюция ..., 1988; Гаджиев и др., 1990). На примере болотных экосистем изучены генетические особенности почв, специфика почвообразования в прошлом, приведены прогнозные модели эволюции почвенного покрова этих экосистем в будущем (Бахнов, 1989). На основе обобщения сведений об особенностях почвообразования в южно-таежной подзоне Западной Сибири изложена теория эволюции почв южной тайги, в которой раскрывается концепция полигенеза дерново-подзолистых почв со вторым гумусовым горизонтом (Гаджиев, 1982; Гаджиев, Дергачева, 1995). Расширены представления о региональных особенностях генезиса и эволюции ионно-солевого профиля засоленных почв юга Западной Сибири (Сеньков, 1989; Елизарова и др., 1999). Начаты мониторинговые работы, связанные с изменениями почвенного покрова под влиянием естественных и антропогенных факторов в разных районах Западной Сибири. Так, начато исследование молодого почвообразования на территории обсыхающих озерных котловин в Барабинской пониженной равнине и в северной Кулунде (рис. 4).



Рисунок 4. Б.А. Смоленцев проводит исследования последствий аридизации климата. Фото Е.Н. Смоленцевой.

В 1995 году начат многолетний мониторинг влияния нефтедобычи на состояние почвенного покрова (рис. 5) в северо-таежной подзоне Западной Сибири (Васильев и др., 1998; Смоленцев, 2003), который на Ноябрьском экологическом полигоне продолжается по сей день (Махатков и др., 2023) (рис. 6, 7). Также исследовалось влияние агрогенных факторов на состояние и функции органического вещества пахотных почв. Фундаментальные исследования качественного состояния органического вещества почв и его устойчивости выявили уязвимость гумуса сибирских черноземов при орошении (Кленов, 1998).



Рисунок 5. В лагере во время исследований на Ноябрьском экологическом полигоне. Фото Б.А. Смоленцева.



Рисунок 6. Сотрудники лаборатории Б.А. Смоленцев (крайний слева) и И.Д. Махатков (в центре) с представителями Русского географического общества и со школьниками на Ноябрьском экологическом полигоне. Сентябрь 2022 года. Фото Е. Деменюк.



Рисунок 7. Б.А. Смоленцев читает лекцию о таежных почвах на ноябрьском экологическом полигоне. Сентябрь 2023 г. Фото Е. Деменюк.

В начале – середине 2000-х гг. назрела необходимость освоения данных космостъемки и использование методов геоинформационных систем (ГИС) в целях почвенного картографирования. Стали активно внедряться не только прямой метод диагностики почв – морфологический анализ почвенного профиля, но и косвенные методы диагностики почв по факторам почвообразования: рельефу и растительности (Гаджиев, Устинов, 2001; Дитц, Смоленцев, 2002; Гаджиев и др., 2006). Проведен анализ возможности цифровой обработки снимков в целях выделения почвенных контуров (Елизарова и др., 2006; Гопп, 2007). Для целей почвенного картографирования привлекались модели ландшафтной структуры ключевых участков и оценивались возможности пространственного моделирования почвенного покрова (Добрецов и др., 2005).

Ключевыми в это время становятся ландшафтная индикация почвенного покрова и создание мелкомасштабных и среднемасштабных почвенных карт для разных географических областей на основе автоматического дешифрирования космических снимков и разработки ГИС-систем (Смоленцев, Воложжина, 2004; Смоленцев, Смоленцева, 2005; Лямина и др., 2009). Результатом этой работы стали – обновленная почвенная карта Новосибирской области (М 1 : 1 000 000) (Почвенная карта ..., 2007) и среднемасштабные почвенные карты (М 1 : 1 00 000) территорий заповедно-природного парка Сибирские Увалы и заповедника Кузнецкий Алатау с охранный зоной.

Одновременно с этой работой проводились исследования генетических особенностей озерно-пойменного почвообразования с применением бассейнового подхода (Казанцев и др., 2005), исследования почвенного покрова ландшафтов предгорных возвышенностей Алтае-Саянской горной области (Смоленцева, 2008), оценка факторов латеральной дифференциации почвенно-растительного покрова дренированных равнин Приобья (Гопп и др., 2008).

Проведена масштабная работа по оценке влияния аридизации климата на трансформацию почвенного покрова в степной зоне юга Западной Сибири (Meyer et al., 2008; Смоленцев и др., 2007). Разработаны методы вероятностно-статистического моделирования изменения во времени свойств почв, подверженных агрогенной трансформации (Михеева, 2005, 2010).

В 2010-х гг. использование ГИС-систем для цифрового почвенного картографирования становится стандартным (Гопп, 2013). Наряду со средне- и крупномасштабным цифровым почвенным картографированием, продолжается создание пространственно-распределенных баз данных свойств почв на основе уже имеющихся бумажных карт (Смоленцев и др., 2017а). На основе полученных ГИС-проектов разрабатываются и фундаментальные проблемы генезиса и трансформации свойств почв (Смоленцев и др., 2017б). Так, ведутся исследования засоленных комплексов на территории юга Западной Сибири (Елизаров, Попов, 2018); обновляются данные о генезисе свойств почв севера Западной Сибири (Смоленцев, Махатков, 2024) и ее горных территорий, в частности, гор Кузнецкого Алатау (Смоленцева, 2015; Смоленцев, Смоленцева, 2018, 2020); ведется моделирование свойств почв агроландшафтов (Гопп и др., 2017).

Сегодня, как и в предыдущие исторические этапы, круг интересов лаборатории географии и генезиса очень широк. Использование современных цифровых технологий наряду со стандартными, принятыми в почвоведении, аналитическими методами позволяет проводить исследования свойств почв и структуры почвенного покрова в контексте пространства и времени. Расширяется и география проведения работ: в ходе выполнения межинститутских проектов (Большая научная экспедиция «Биоразнообразия»; ВИП ГЗ «РИТМ углерода») изучаются ландшафты от арктических до сухостепных территорий. Поднимаются фундаментальные вопросы генезиса отдельных почвенных свойств и их связи между собой; ведется выявление индикаторов профилеобразующих процессов, а также проводится моделирование трансформации структуры почвенного покрова под влиянием различных факторов на основе геосистемного анализа. Все вышеперечисленное составляет задел фундаментальных исследований генетического почвоведения для сотрудников лаборатории географии и генезиса почв на многие годы вперед.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект № 121031700316-9).

ЛИТЕРАТУРА

- Бахнов В.К. Эволюционно-генетическая сущность современного болотного почвообразования // Тезисы докладов VIII Всесоюзного съезда почвоведов: в 6-ти томах (Новосибирск, 14–18 августа 1989 г.) / Р.В. Ковалев (отв. ред.). Том 4. Новосибирск: Институт почвоведения и агрохимии, 1989. С. 6.
- Васильев С.В., Гаджиев И.М., Сеньков А.А., Смоленцев Б.А. Мониторинг состояния почвенного покрова на Ноябрьском экологическом полигоне (Западная Сибирь) // Антропогенная деградация почвенного покрова и меры ее предупреждения: тезисы и доклады Всероссийской конференции (Москва, 16–18 июня 1998 г.). Москва: Изд-во Почвенного ин-та им. В.В. Докучаева, 1998. С. 159–160.
- Волковинцер В.И. Степные криоаридные почвы. Новосибирск: Наука, 1978. 208 с.
- Гаджиев И.М. Почвы бассейна реки Васюган. Новосибирск: Новосибирское отделение издательства «Наука», 1976. 152 с.
- Гаджиев И.М. Эволюция почв южной тайги Западной Сибири. Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1982. 278 с.
- Генезис, эволюция и география почв Западной Сибири / И.М. Гаджиев (отв. ред.) и др. Новосибирск: Новосибирское отделение издательства «Наука», 1988. 224 с.
- Гаджиев И.М., Дергачева М.И., Курачев В.М. Профиледифференцирующие процессы // Проблемы почвоведения в Сибири: Сборник научных трудов / И.М. Гаджиев (отв. ред.). Новосибирск: Наука. Сибирское отделение, 1990. С. 42–47.
- Гаджиев И.М., Дергачева М.И. Экспериментальное изучение эволюции почв // Почвоведение. 1995. № 3. С. 277–289.
- Гаджиев И.М., Устинов М.Т. Компьютерное моделирование структурно-функциональной организации и динамики почвенных экосистем методом трансект-катены // Биоразнообразие и динамика экосистем Северной Евразии: информационные технологии и моделирование (WITA'2001): Тезисы докладов (Новосибирск, 09–14 июля 2001 г.). Новосибирск: Институт цитологии и генетики СО РАН, 2001. С. 151.
- Гаджиев И.М., Дитц Л.Ю., Чичулин А.В., Танасиенко А.А. Почвы как компонент экосистемы // Биоразнообразие и динамика экосистем: информационные технологии и моделирование: монография. Новосибирск: Издательство СО РАН, 2006. С. 54–70.
- Генезис почв Западной Сибири: сборник статей / Р.В. Ковалев (отв. ред.) и др. Новосибирск: Редакционно-издательский отдел Сибирского отделения АН СССР, 1964. 216 с. (Труды Биологического института; выпуск 12).
- Гопп Н.В. Анализ количественных характеристик компонентов ландшафта, рассчитываемых по многозональной и радиолокационной съемке // Сибирский экологический журнал. 2007. Том 14. № 5. С. 859–869.
- Гопп Н.В. Алгоритмический подход при составлении цифровых почвенных карт на основе лабораторно-полевых и спутниковых данных // Исследование Земли из космоса. 2013. № 3. С. 58.
<https://doi.org/10.7868/S0205961413020036>

- Гопп Н.В., Куликова Е.А., Смирнов В.В. Исследование закономерностей латеральной дифференциации почвенного покрова в зависимости от факторов почвообразования с использованием многозональных и радиолокационных снимков // Гео-Сибирь. 2008. Том 3. № 2. С. 239–243.
- Гопп Н.В., Нечаева Т.В., Савенков О.А., Смирнова Н.В., Смирнов В.В. Индикационные возможности NDVI в прогнозном картографировании свойств пахотного горизонта почв склоновых позиций на юге Западной Сибири // Почвоведение. 2017. № 11. С. 1377–1389. <https://doi.org/10.7868/S0032180X17110065>
- Дитц Л.Ю., Смоленцев Б.А. Геоинформационная система в почвенной картографии. Новосибирск: Наука, 2002. 77 с.
- Добрецов Н.Н., Зольников И.Д., Королук А.Ю., Мистрюков А.А., Смоленцев Б.А., Смоленцева Е.Н., Мартысевич У.В., Макунина Н.И., Мальцева Т.В. Разработка системы комплексного описания полигонов для интерпретации данных космической съемки // Сибирский экологический журнал. 2005. Том 12. № 6. С. 1031–1038.
- Елизарова Т.Н., Казанцев В.А., Магаева Л.А., Устинов М.Т. Эколого-мелиоративный потенциал почвенного покрова Западной Сибири. Институт почвоведения и агрохимии СО РАН. Новосибирск: ФГУП «Наука», 1999. 240 с.
- Елизарова Т.Н., Дитц Л.Ю., Лопатовская О.Г. Мониторинг динамических почвенных процессов на юге Сибири // Вестник Сибирской государственной геодезической академии. 2006. № 11. С. 194–198.
- Елизаров Н.В., Попов В.В. Влияние агробиологической мелиорации на почвенный поглощающий комплекс солонцов Барабинской низменности // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. 2018. Том 48. № 6. С. 13–20. <https://doi.org/10.26898/0370-8799-2018-6-2>
- Казанцев В.А., Магаева Л.А., Устинов М.Т., Якутин М.В. Формирование и эволюция почв обсыхающих территорий соленых озер (на примере озера Чаны) // Сибирский экологический журнал. 2005. Том 12. № 2. С. 321–339.
- Карта структуры почвенного покрова средней и южной части Западной Сибири. Москва: ВАСХНИЛ, 1976.
- Кленов Б.М. Устойчивость гумуса почв Западной Сибири в условиях антропогенного влияния. Автореферат диссертации ... д-ра биол. наук. Новосибирск, 1998. 40 с.
- Ковалев Р.В., Гаджиев И.М. Вторичноподзолистые почвы Западной Сибири // Лес и почва: материалы Всесоюзной научной конференции по лесному почвоведению (Красноярск, 15 июня 1965 года – 19 июня 1968 года) / Н.В. Орловский (отв. ред.). Красноярск: Красноярское книжное издательство, 1968. С. 144–148.
- Ковалев Р.В., Гаджиев И.М. Некоторые особенности почвенного покрова и структура земельных ресурсов Западной Сибири // Природные условия Западной Сибири и переброска стока рек в Среднюю Азию. Новосибирск: Наука, 1975. С. 49–65.
- Ковалев Р.В., Гаджиев И.М. Почвенный покров и интенсификация сельскохозяйственного производства в Западной Сибири // Географические проблемы при сельскохозяйственном освоении Сибири. Новосибирск: Наука. Сибирское отделение, 1977. С. 4–10.
- Ковалев Р.В., Трофимов С.С. Общая характеристика почвенного покрова Западной Сибири // Агрохимическая характеристика почв СССР. Том 9. Москва: ФГУП «Наука», 1968. С. 5–31.
- Ковалев Р.В., Хмелев В.А. Темноцветные почвы парковых лиственных лесов Центрального Алтая // Лес и почва: материалы Всесоюзной научной конференции по лесному почвоведению (Красноярск, 15 июня 1965 года – 19 июня 1968 года) / Н.В. Орловский (отв. ред.). Красноярск: Красноярское книжное издательство, 1968. С. 134–143.
- Ковалев Р.В., Селяков С.Н., Гаджиев И.М., Трофимов С.С., Панин П.С., Давыдова Г.А., Шадрин З.Ф., Ильин В.Б., Немлиенко В.К., Рябова Т.Н. Почвы Новосибирской области. Новосибирск: Новосибирское отделение издательства «Наука», 1966. 422 с.
- Ковалев Р.В., Панин П.С., Панфилов В.П., Селяков С.Н. Почвы Кулундинской степи. Новосибирск: Сибирское отделение издательства «Наука», 1967. 292 с.
- Ковалев Р.В., Волковинцер В.И., Хмелев В.А. Агрохимическая характеристика почв земледельческих районов Горно-Алтайской автономной области // Агрохимическая характеристика почв СССР. Том 9. Москва: ФГУП «Наука», 1968. С. 93–117.
- Ковалев Р.В., Кленов Б.М., Арсланов Х.А. Вопросы радиоуглеродного датирования органического вещества дерново-подзолистых почв со вторым гумусовым горизонтом Томского Приобья // Известия Сибирского отделения Академии наук СССР. Серия биологических наук. 1972. № 3. С. 6–9.

- Ковалев Р.В., Ковалева С.Р., Корсунов В.М., Таранов С.А. Специфика подзолообразования в почвах низкогорий и среднегорий горного окаямления юго-восточной части Западной Сибири // Труды X Международного конгресса почвоведов. Материалы конгресса (Москва, 10–17 мая 1975 г.) / Н.А. Ногина (отв. редактор). Том VI, часть 1. Генезис, классификация и география почв. Москва: Федеральное государственное унитарное предприятие «Академический научно-издательский, производственно-полиграфический и книгораспространительский центр «Наука», 1974. С. 142–148.
- Ковалев Р.В., Копосов Г.Ф., Гаджиев И.М., Волковинцер В.И. О почвенном покрове западной части зоны БАМ и возможностях его сельскохозяйственного использования // Исследование почв Сибири. Новосибирск: Наука, 1977а. С. 19–28.
- Ковалев Р.В., Копосов Г.Ф., Гаджиев И.М., Хмелев В.А., Курачев В.М., Волковинцер В.И. Некоторые аспекты классификации почв Западной Сибири // Исследование почв Сибири. Новосибирск: Наука, 1977б. С. 5–18.
- Ковалев Р.В., Волковинцер В.И., Макеев О.В., Василевская В.Д. Плодородие и рациональное использование почв Крайнего Севера (тундровая и лесотундровая зоны) // Значение почвенных исследований в решении продовольственной программы. Тбилиси, 1981а. С. 130–147.
- Ковалев Р.В., Корсунов В.М., Шоба В.Н. Процессы и продукты почвообразования в темнохвойных лесах / С.С. Трофимов (отв. ред.). Новосибирск: Наука, 1981б. 120 с.
- Копосов Г.Ф. Генезис почв гор Прибайкалья / Р.В. Ковалев (отв. ред.). Новосибирск: Наука, 1983. 255 с.
- Корсунов В.М. Генетические особенности глубокооподзоленных почв черневой тайги Салаира и некоторые элементы современного почвообразования в них. Автореферат диссертации ... канд. биол. наук. Институт почвоведения и агрохимии СО АН СССР, Новосибирск, 1970. 30 с.
- Курачев В.М., Рябова Т.Н. Засоленные почвы Западной Сибири. Новосибирск: Новосибирское отделение издательства «Наука», 1981. 153 с.
- Лямина В.А., Зольников И.Д., Королюк А.Ю., Смоленцев Б.А., Глушкова Н.В. Использование методов ГИС и ДЗ для картографирования и мониторинга гетерогенных ландшафтов // Гео-Сибирь. 2009. Том 4. № 1. С. 171–175.
- Махатков И.Д., Смоленцев Б.А., Ермолов Ю.В. Динамика структуры и продуктивности соснового кустарничково-лишайникового леса северной тайги по результатам прямых наблюдений // Международный научно-исследовательский журнал. 2023. № 4 (130). <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.130.31>
- Методические указания по бонитировке почв Сибири на генетико-производственной основе / АН СССР, Сибирское отделение, Институт почвоведения и агрохимии и др. Сост. Н.Ф. Тюменцевым; Том. гос. ун-т им. В.В. Куйбышева, НИИ биологии и биофизики. Новосибирск: Институт почвоведения и агрохимии, 1979. 42 с.
- Михеева И.В. Пространственные флуктуации и вероятностно-статистические распределения свойств каштановых почв Кулундинской степи // Почвоведение. 2005. № 3. С. 316–327.
- Михеева И.В. Изменение вероятностных распределений фракций гранулометрического состава каштановых почв Кулундинской степи под воздействием природных и антропогенных факторов // Почвоведение. 2010. № 12. С. 1456–1467.
- Особенности формирования и использования почв Сибири и Дальнего Востока (к XII Международному конгрессу почвоведов) / Р.В. Ковалев (отв. ред.). АН СССР, Сибирское отделение, Институт почвоведения и агрохимии. Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1982. 224 с.
- Почвенная карта юго-восточной части Западной Сибири [Карты] / разраб. Ин-том почвоведения и агрохимии СО АН СССР и Западно-Сибирским регион. науч.-исслед. гидрометеорол. ин-том; спец. содержание сост. И.М. Гаджиев [и др.]; отв. ред. д-р с.-х. наук Р.В. Ковалев; сост. и подгот. к печати ф-кой № 3 ГУГК в 1977 г.; ред. А.Г. Чимшидова. Москва: ГУГК, 1977. 1 л.
- Почвенная карта Новосибирской области. Масштаб 1:1 000 000. Новосибирск: Издательство ФГПУ «Новосибирская картографическая фабрика», 2007.
- Почвы Баргузинской котловины / Р.В. Ковалев (отв. ред.). Новосибирск: Наука, 1983. 270 с.
- Почвы Горно-Алтайской автономной области / Р.В. Ковалев (отв. ред.). Новосибирск: Наука, 1973. 352 с.
- Почвы зоны БАМ / Р.В. Ковалев (отв. ред.). АН СССР, Сибирское отделение; Институт почвоведения и агрохимии. Новосибирск: Наука, 1979. 304 с.
- Путеводитель почвенной экскурсии по Западной Сибири. Тур VI / Р.В. Ковалев (отв. ред.). АН СССР, Сибирское отделение; Институт почвоведения и агрохимии. Новосибирск: Наука, 1974. 100 с.

- Рябова Т.Н. Солевой режим корковых и среднестолбчатых солонцов Барабинской низменности при их освоении. Автореферат диссертации ... канд. биол. наук. Институт почвоведения и агрохимии СО АН СССР, Новосибирск, 1972. 29 с.
- Сеньков А.А. Галогенез степных автоморфных почв Ишим-Иртышского междуречья // Тезисы докладов VIII Всесоюзного Съезда почвоведов / Р.В. Ковалев (отв. ред.). Новосибирск: Институт почвоведения и агрохимии, 1989. С. 35.
- Смоленцев Б.А. Техногенные нарушения почвенного покрова на Западно-Ноябрьском месторождении нефти // Вестник Томского государственного университета. Приложение № 7, сентябрь 2003 / Научный редактор И.М. Гаджиев. Томск: Томский Государственный Университет, 2003. С. 196–205.
- Смоленцев Б.А., Вологжина О.В. Пространственная и функционально-генетическая характеристика почвенных комбинаций Барабинской равнины // Сибирский экологический журнал. 2004. Том 11. № 3. С. 355–366.
- Смоленцев Б.А., Махатков И.Д. Морфогенетические особенности структуры почвенного покрова Притазовского заполярья (Западная Сибирь) // Почвы и окружающая среда. 2024. Том 7. № 4. с270. <https://doi.org/10.31251/pos.v7i4.270>
- Смоленцев Б.А., Смоленцева Е.Н. Особенности структуры почвенного покрова Сокурской возвышенности // Сибирский экологический журнал. 2005. Том 12. № 5. С. 809–821.
- Смоленцев Б.А., Смоленцева Е.Н. Состав и структура почвенного покрова территорий гумидного сектора Кузнецкого Алатау // 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 г.) / А.И. Сысо (отв. ред.). Часть 1. Томск: Издательский дом ТГУ, 2018. С. 111–115.
- Смоленцев Б.А., Смоленцева Е.Н. Буроземы Кузнецкого Алатау, их свойства и разнообразие // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2020. № 50. С. 6–27. <https://doi.org/10.17223/19988591/50/1>
- Смоленцев Б.А., Майер Б., Смоленцева Е.Н. Индикаторы опустынивания в Северной Кулунде // Актуальные проблемы экологии и природопользования Сибири в глобальном контексте: сборник статей в двух частях / Томский государственный университет. Часть 2. Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2007. С. 207–209.
- Смоленцев Б.А., Соколова Н.А., Сапрыкин О.И. Оценка неоднородности почвенного покрова разных гипсометрических уровней Барабинской низменности // Вестник НГАУ (Новосибирский государственный аграрный университет). 2017а. № 1(42). С. 122–129.
- Смоленцев Б.А., Сапрыкин О.И., Соколова Н.А., Елизаров Н.В. Влияние почв микрозападин на структуру агроландшафтов лесостепной зоны Западной Сибири // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. 2017б. Том 47. № 6(259). С. 11–18. <https://doi.org/10.26898/0370-8799-2017-6-2>
- Смоленцева Е.Н. Особенности почвообразования коренных пород в северо-западных предгорьях Алтая // Вестник Томского государственного университета. 2008. № 317. С. 249–252.
- Смоленцева Е.Н. Структурно-метаморфические почвы Государственного природного заповедника "Кузнецкий Алатау" // Труды Тигирекского заповедника. 2015. № 7. С. 167–172. https://doi.org/10.53005/20767390_2015_7_167
- Структура, функционирование и эволюция системы биogeоценозов Барабы. Том 1. Биogeоценозы и их компоненты / Р.В. Ковалев (отв. ред.). Институт почвоведения и агрохимии. Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1974. 307 с.
- Структура, функционирование и эволюция системы биogeоценозов Барабы. Том 2. Биogeоценозотические процессы / Р.В. Ковалев (отв. ред.). Институт почвоведения и агрохимии. Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1976. 495 с.
- Тюменцев Н.Ф., Гаджиев И.М., Черникова М.И., Теплова Г.Х. Бонитеты почв Западной Сибири // Специфика почвообразования в Сибири. Новосибирск: Издательство "Наука" СО, 1979. С. 53–60.
- Meyer B.C., Schreiner V., Smolentseva E.N., Smolentsev B.A. Indicators of desertification in the Kulunda Steppe in the south of Western Siberia // Archives of Agronomy and Soil Science. 2008. Vol. 54. No. 6. P. 585–603. <https://doi.org/10.1080/03650340802342268>

Поступила в редакцию 20.06.2025

Принята 25.06.2025

Опубликована 04.07.2025

Сведения об авторах:

Соколова Наталья Александровна – кандидат биологических наук, заведующий лабораторией географии и генезиса почв ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск, Россия), nasokolova30@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8927-4280>

Смоленцев Борис Анатольевич – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории географии и генезиса почв ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск, Россия); smolentsev.b@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9749-8233>

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 History of Research in the Laboratory of Soil Geography and Genesis of the Institute of Soil Science and Agrochemistry (SB RAS, Novosibirsk, Russia)

© 2025 N. A. Sokolova , B. A. Smolentsev 

Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Lavrentieva 8/2, Novosibirsk, Russia. E-mail: nasokolova30@yandex.ru

The Laboratory of Soil Geography and Genesis of the Institute of Soil Science and Agrochemistry (SB RAS, Novosibirsk, Russia) is the oldest in the Institute. For more than half a century of its existence, the scale and details of soil and soil cover studies have steadily increased. At the beginning of the Laboratory's research, soil cover surveys in the main agricultural regions of West Siberia were carried out, serving as the basis for the subsequent production of various thematic small-scale maps of the southeastern part of West Siberia, medium-scale soil maps of several regions of Siberia, as well as a series of sheets of the USSR State Soil Map. Along with the applied work, fundamental problems of the specifics of the genesis of Siberian soils were also addressed. At the following stages, the geography of cartographic work gradually expanded; the specifics of the regimes and properties of Siberian soils of different taxonomic groups were revealed. Participation in the international research programs and the USSR projects laid the foundation for the deployment of large-scale research in various natural areas and regions. Subsequent work on the qualitative assessment of soils served as the basis for the development of their classification, the theoretical basis for the introduction of adaptive landscape farming systems, and studies of the influence of anthropogenic and climatic factors on the current genesis and evolution of soils. In recent decades, the laboratory has used the latest approaches and methods for developing digital soil maps, geoinformation systems, and data modeling, along with classical studies of individual soil properties.

Keywords: *geography of soils; soil genesis; soil evolution; soil cartography.*

How to cite: Sokolova N.A., Smolentsev B.A. The History of Research in the Laboratory of Soil Geography and Genesis of the Institute of Soil Science and Agrochemistry (SB RAS, Novosibirsk, Russia). The Journal of Soils and Environment. 2025. 8(3). e317. DOI: [10.31251/pos.v8i3.317](https://doi.org/10.31251/pos.v8i3.317) (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).

REFERENCES

- Bakhnov V.K. The evolutionary and genetic essence of modern swamp soil formation. Abstracts of the VIII All-Union Congress of Soil Scientists: in 6 volumes (Novosibirsk, 14–18 August, 1989) / R.V. Kovalev (ed.). Vol. 4. Novosibirsk: Institute of Soil Science and Agrochemistry, 1989. P. 6. (in Russian).
- Vasiliev S.V., Gadzhiev I.M., Senkov A.A., Smolentsev B.A. Monitoring of soil cover at the Noyabrsk Ecological polygon (Western Siberia). In book: Anthropogenic degradation of soil cover and measures to prevent it. Abstracts and reports of the All-Russian Conference (Moscow, 16–18 June, 1998). Moscow: Publishing House of the V.V. Dokuchaev Soil Institute, 1998. P. 159–160 (in Russian).
- Volkovintser V.I. Steppe cryoarid soils. Novosibirsk: Nauka Publ., 1978. 208 p. (in Russian).
- Gadzhiev I.M. Soils of the Vasyugan river basin. Novosibirsk: Nauka Publ., 1976. 152 p. (in Russian).
- Gadzhiev I.M. Evolution of soils of the southern taiga of Western Siberia. Novosibirsk: Nauka Publ., Siberian Branch, 1982. 278 p. (in Russian).

The genesis, evolution and geography of soils in Western Siberia / I. M. Gadzhiev (ed.) and others. Novosibirsk: Novosibirsk Branch of Nauka Publishing House, 1988. 224 p. (in Russian).

Gadzhiev I.M., Dergacheva M.I., Kurachev V.M. Profiledifferentiating processes. In book: Problems of soil science in Siberia: Collection of scientific papers / I.M. Gadzhiev (ed.). Novosibirsk: Nauka Publ., Siberian Branch, 1990. P. 42–47. (in Russian).

Gadzhiev I.M., Dergacheva M.I. Experimental research of soil evolution. *Pochvovedenie*. 1995. No. 3. P. 277–289. (in Russian).

Gadzhiev I.M., Ustinov M.T. Computer modelling of the structural and functional organization and dynamics of soil ecosystems by the transect-catenal method. In book: Biodiversity and ecosystem dynamics of Northern Eurasia: Information Technology and Modeling (WITA'2001). Abstracts of reports (Novosibirsk, 09–14 July, 2001). Novosibirsk: Institute of Cytology and Genetics SB RAS, 2001. p. 151. (in Russian).

Gadzhiev I.M., Dits L.Yu., Chichulin A.V., Tanasiyenko A.A. Soils as an ecosystem component. In book: Biodiversity and ecosystem dynamics: information technologies and modeling. Novosibirsk: Publishing House of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2006. P. 54–70. (in Russian).

The genesis of soils in Western Siberia: Collection of Articles / R.V. Kovalev (ed.) and others. Novosibirsk: Editorial and Publishing Department of the Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences, 1964. 216 p. (Proceedings of the Biological Institute; Issue 12).

Gopp N.V. Analysis of quantitative characteristics of landscape components calculated according to polyzonal and radio-locating survey. *Sibirskij Ekologicheskij Zhurnal*. 2007. Vol. 14. No. 5. P. 859–869. (in Russian).

Gopp N.V. Algorithmic approach in the compilation of digital soil maps based on laboratory, field and satellite data. *Issledovanie zemli iz kosmosa*. 2013. No. 3. P. 58. (in Russian). <https://doi.org/10.7868/S0205961413020036>

Gopp N.V., Kulikova E.A., Smirnov V.V. Research of regularities of lateral differentiation of soil cover depending on soil-forming factors with usage polyzonal and radio-locating survey. *Geo-Siberia*. 2008. Vol. 3. No. 2. P. 239–243. (in Russian).

Gopp N.V., Nechaeva T.V., Savenkov O.A., Smirnova N.V., Smirnov V.V. Indicative capacity of NDVI in predictive mapping of the properties of plow horizons of soils on slopes positions in the south of Western Siberia. *Eurasian Soil Science*. 2017. Vol. 50. No. 11. P. 1332–1343. <https://doi.org/10.1134/S1064229317110060>

Dits L.Yu., Smolentsev B.A. Geoinformation system in soil cartography. Novosibirsk: Nauka Publ., 2002. 77 p. (in Russian).

Dobretsov N.N., Zolnikov I.D., Korolyuk A.Yu., Mistryukov A.A., Smolentsev B.A., Smolentseva E.N., Martysevich U.V., Makunina N.I., Maltseva T.V. Development of a system of complex description of polygons for interpretation of space survey data. *Sibirskij Ekologicheskij Zhurnal*. 2005. Vol. 12. No. 6. P. 1031–1038. (in Russian).

Elizarova T.N., Kazantsev V.A., Magaeva L.A., Ustinov M.T. Ecological and reclamative potential of West-Siberian soil cover. Institute of Soil Science and Agrochemistry SB RAS. Novosibirsk: Nauka Publ., 1999. 240 p. (in Russian).

Elizarova T.N., Dits L.Yu., Lopatovskaya O.G. Monitoring of dynamic soil processes in southern Siberia. *Vestnik Sibirskoy Gosudarstvennoy Geodezicheskoy Akademii*. 2006. No. 11. P. 194–198. (in Russian).

Elizarov N.V., Popov V.V. Effect of agrobiological reclamation on the soil absorbing solonchaks complex of Baraba lowland. *Siberian Herald of Agricultural Science*. 2018. Vol. 48. No. 6. P. 13–20. (in Russian). <https://doi.org/10.26898/0370-8799-2018-6-2>

Kazantsev V.A., Magaeva L.A., Ustinov M.T., Yakutin M.V. Forming and evolution of soils of drying territories of salt lakes (on the example of Lake Chany). *Sibirskij Ekologicheskij Zhurnal*. 2005. Vol. 12. No. 2. P. 321–339. (in Russian).

Map of the soil cover structure in the middle and southern parts of Western Siberia. Moscow: VASHNIL, 1976. (in Russian).

Klenov B.M. Soil humus stability in Western Siberia under anthropogenic influence. Abstract of Dissertation ... Dr. of Biol. Sci. Novosibirsk, 1998. 40 p. (in Russian).

Kovalev R.V., Gadzhiev I.M. Secondary podzolic soils of Western Siberia. In book: Forest and soil. Proceedings of the All-Union Scientific Conference on Forest Soil Science (Krasnoyarsk, 15 June, 1965 –19 June, 1968) / N.V. Orlovsky (ed.). Krasnoyarsk: Krasnoyarsk Book Publishing House, 1968. P. 144–148. (in Russian).

Kovalev R.V., Gadzhiev I.M. Some features of the soil cover and the structure of land resources in Western Siberia. In book: The natural conditions of Western Siberia and the transfer of river flow to Central Asia. Novosibirsk: Nauka Publ., 1975. P. 49–65. (in Russian).

- Kovalev R.V., Gadzhiev I.M. Soil cover and intensification of agricultural production in Western Siberia. In book: Geographical problems in the agricultural development of Siberia. Novosibirsk: Nauka Publ., Siberian Branch, 1977. P. 4–10. (in Russian).
- Kovalev R.V., Trofimov S.S. General characteristics of the soil cover of Western Siberia. In book: Agrochemical characteristics of soils of the USSR. Vol. 9. Moscow: Nauka Publ., 1968. P. 5–31. (in Russian).
- Kovalev R.V., Khmelev V.A. Dark-colored soils of park larch forests of Central Altai. In book: Forest and soil. Proceedings of the All-Union Scientific Conference on Forest Soil Science (Krasnoyarsk, 15 June, 1965 –19 June, 1968) / N.V. Orlovsky (ed.). Krasnoyarsk: Krasnoyarsk Book Publishing House, 1968. P. 134–143. (in Russian).
- Kovalev R.V., Selyakov S.N., Gadzhiev I.M., Trofimov S.S., Panin P.S., Davydova G.A., Shadrina Z.F., Ilyin V.B., Nemlienko V.K., Ryabova T.N. Soils of the Novosibirsk region. Novosibirsk: Novosibirsk Branch of Nauka Publ., 1966. 422 p. (in Russian).
- Kovalev R.V., Panin P.S., Panfilov V.P., Selyakov S.N. Soils of the Kulunda steppe. Novosibirsk: Siberian Branch of Nauka Publ., 1967. 292 p. (in Russian).
- Kovalev R.V., Volkovintser V.I., Khmelev V.A. Agrochemical characteristics of soils in agricultural areas of the Gorno-Altaysk Autonomous region. In Book: Agrochemical characteristics of soils of the USSR. Vol. 9. Moscow: Nauka Publ., 1968. P. 93–117. (in Russian).
- Kovalev R.V., Klenov B.M., Arslanov H.A. Issues of radiocarbon dating of organic matter of sod-podzolic soils with the second humus horizon of the Tomsk region. Proceedings of the Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences. Biological Sciences Series. 1972. No. 3. P. 6–9. (in Russian).
- Kovalev R.V., Kovaleva S.R., Korsunov V.M., Taranov S.A. The specificity of podzol formation in soils of low- and medium-mountain bordering the southeastern part of Western Siberia. In book: Proceedings of X International Congress of Soil Scientists. Proceedings of the Congress (Moscow, 10–17 May, 1975) / N.A. Nogina (ed.). Volume VI, Part 1. Genesis, classification and geography of soils. Moscow: Nauka Publ., 1974. P. 142–148. (in Russian).
- Kovalev R.V., Koposov G.F., Gadzhiev I.M., Volkovintser V.I. About the soil cover of the western part of the BAM zone and the possibilities of its agricultural use. In book: Siberian Soil Research. Novosibirsk: Nauka Publ., 1977a. P. 19–28. (in Russian).
- Kovalev R.V., Koposov G.F., Gadzhiev I.M., Khmelev V.A., Kurachev V.M., Volkovintser V.I. Some aspects of soil classification in Western Siberia. In book: Siberian Soil Research. Novosibirsk: Nauka Publ., 1977b. P. 5–18. (in Russian).
- Kovalev R.V., Volkovintser V.I., Makeev O.V., Vasilevskaya V.D. Fertility and rational use of soils of the Far North (tundra and forest-tundra zones). In book: Importance of soil research in solving the food program. Tbilisi, 1981a. P.130–147. (in Russian).
- Kovalev R.V., Korsunov V.M., Shoba V.N. Processes and products of soil formation in dark coniferous forests / S.S. Trofimov (ed.). Novosibirsk: Nauka Publ., 1981b. 120 p. (in Russian).
- Koposov G.F. The genesis of the soils of the Baikal mountains / R.V. Kovalev (ed.). Novosibirsk: Nauka Publ., 1983. 255 p. (in Russian).
- Korsunov V.M. Genetic features of deep-podzolic soils of the Salair black taiga and some elements of modern soil formation in them. Abstract of Dissertation ... Cand. of Biol. Sci. Institute of Soil Science and Agrochemistry SB Academy of Sciences of the USSR, Novosibirsk, 1970. 30 p. (in Russian).
- Kurachev V. M., Ryabova T. N. Saline soils of Western Siberia. Novosibirsk: Novosibirsk Branch of Nauka Publ., 1981. 153 p. (in Russian).
- Lyamina V.A., Zolnikov I.D., Korolyuk A. Yu., Smolentsev B.A., Glushkova N.V. Using a methods of GIS and RS for mapping and monitoring heterogeneous landscapes. Geo-Siberia. 2009. Vol. 4. No. 1. P. 171–175. (in Russian).
- Makhatkov I.D., Smolentsev B.A., Ermolov Yu.V. Dynamics of structure and productivity of northern taiga pine suffrutescent and lichenous forest based on direct observations. *Meždunarodnyj naučno-issledovatel'skij žurnal* (International Research Journal). 2023. No. 4 (130). (in Russian). <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.130.31>
- Methodological guidelines for bonitation of Siberian soils on a genetic-production basis / USSR Academy of Sciences, Siberian Branch, Institute of Soil Science and Agrochemistry et al. Comp. N.F. Tyumentsev. Novosibirsk: Institute of Soil Science and Agrochemistry, 1979. 42 p. (in Russian).
- Mikheeva I.V. Spatial fluctuations and statistical probability distributions of chestnut soil properties in the Kulunda steppe. *Eurasian Soil Science*. 2005. Vol. 38. No. 3. P. 278–288.

Mikheeva I.V. Changes in the probability distributions of particle size fractions in chestnut soils of the Kulunda Steppe under the effect of natural and anthropogenic factors. *Eurasian Soil Science*. 2010. Vol. 43. No. 12. P. 1351–1361. <https://doi.org/10.1134/S1064229310120057>

Specifics of the formation and use of soils in Siberia and the Far East (by the XII International Congress of Soil Scientists) / R.V. Kovalev (ed.). USSR Academy of Sciences, Siberian Branch, Institute of Soil Science and Agrochemistry. Novosibirsk: Nauka Publ., Siberian Branch, 1982. 224 p. (in Russian).

Soil map of the south-eastern part of Western Siberia [Maps] / developed by the Inst. of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences and the West Siberian Regional Research Hydrometeorological Inst.; special contents compiled by I.M. Gadzhiev [et al.]; responsible editor Dr. of Agricultural Sciences R.V. Kovalev; compiled and prepared for publication by Faculty No. 3 of the State University of GUGK in 1977; editor A.G. Chimshidova. Moscow: GUGK, 1977. 1 p. (in Russian).

Soil map of the Novosibirsk region. Scale 1:1,000,000. Novosibirsk: Publishing House of the Novosibirsk Cartographic Factory, 2007. (in Russian).

Soils of the Barguzin basin / R.V. Kovalev (ed.). Novosibirsk: Nauka Publ., 1983. 270 p. (in Russian).

Soils of the Gorno-Altai Autonomous Region / R.V. Kovalev (ed.). Novosibirsk: Nauka Publ., 1973. 352 p. (in Russian).

Soils of the BAM zone / R.V. Kovalev (ed.). USSR Academy of Sciences, Siberian Branch; Institute of Soil Science and Agrochemistry. Novosibirsk: Nauka Publ., 1979. 304 p. (in Russian).

A guide for a soil tour of Western Siberia. Tour VI / R.V. Kovalev (ed.). USSR Academy of Sciences, Siberian Branch; Institute of Soil Science and Agrochemistry. Novosibirsk: Nauka Publ., 1974. 100 p. (in Russian).

Ryabova T.N. The salt regime of the crusty and medium-columnar solonets of the Baraba lowland during their development. Abstract of Dissertation ... Cand. of Biol. Sci. Institute of Soil Science and Agrochemistry SB Academy of Sciences of the USSR, Novosibirsk, 1972. 29 p. (in Russian).

Senkov A.A. Halogenesis of steppe automorphic soils of the Ishim-Irtysh interfluvium. In book: Abstracts of the VIII All-Union Congress of Soil Scientists / R.V. Kovalev (ed.). Novosibirsk: Institute of Soil Science and Agrochemistry, 1989. P. 35. (in Russian).

Smolentsev B.A. Technogenic disturbances of the soil cover at the West Noyabrsk oil field. *Tomsk State University Journal. Supplement No. 7, September 2003* / I.M. Gadzhiev (scientific editor). Tomsk: Tomsk State University, 2003. P. 196–205. (in Russian).

Smolentsev B.A., Vologzhina O.V. Spatial and functional-genetic characterization of soil combinations of the Baraba plain. *Sibirskij Ekologicheskij Zhurnal*. 2004. Vol. 11. No. 3. P. 355–366. (in Russian).

Smolentsev B.A., Makhatkov I.D. Morphogenetic features of the soil cover structure in the Pritazovsky Arctic (West Siberia). *The Journal of Soils and Environment*. 2024. Vol. 7. No. 4. e270. (in Russian). <https://doi.org/10.31251/pos.v7i4.270>

Smolentsev B.A., Smolentseva E.N. Features of the soil cover structure of the Sokur upland. *Sibirskij Ekologicheskij Zhurnal*. 2005. Vol. 12. No. 5. P. 809–821. (in Russian).

Smolentsev B.A., Smolentseva E.N. Components and structure of the soil cover in the territories with humid climate of Kuznetsky Alatau. 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 of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, 10–14 September, 2018)* / A.I. Syso (ed.). Part 1. Tomsk: TSU Publishing House, 2018. P. 111–115. (in Russian).

Smolentsev B.A., Smolentseva E.N. Cambisols of the Kuznetsk Alatau, their properties and diversity. *Tomsk State University Journal of Biology*. 2020. No. 50. P. 6–27. (in Russian). <https://doi.org/10.17223/19988591/50/1>

Smolentsev B.A., Mayer B., Smolentseva E.N. Indicators of desertification in Northern Kulunda. In book: *Actual problems of ecology and nature management of Siberia in a global context. Collection of articles in two parts. Part 2*. Tomsk: National Research Tomsk Polytechnic University Publ., 2007. P. 207–209. (in Russian).

Smolentsev B.A., Sokolova N.A., Saprykin O.I. Assessment of the heterogeneity of the soil cover of different hypsometric levels of the Baraba lowland. *Bulletin of NSAU (Novosibirsk State Agrarian University)*. 2017a. No. 1(42). P. 122–129. (in Russian).

Smolentsev B.A., Saprykin O.I., Sokolova N.A., Elizarov N.V. Impact of soils in micro-depressions on agrolandscapes structure in West Siberian forest-steppe. *Siberian Herald of Agricultural Science*. 2017b. Vol. 47. No. 6(259). P. 11–18. (in Russian). <https://doi.org/10.26898/0370-8799-2017-6-2>

Smolentseva E.N. Characteristic properties of soil formation on weathering products of the bedrock in the north-western foothills of the Altai Mountains. Tomsk State University Journal. 2008. No. 317. P. 249–252. (in Russian).

Smolentseva E.N. Structural-metamorphic soils of Strict Nature Reserve Kuznetsky Alatau. Trudy Tigireksskogo Zapovednika. 2015. No. 7. P. 167–172. (in Russian). https://doi.org/10.53005/20767390_2015_7_167

The structure, functioning and evolution of the Baraba biogeocenosis system. Vol. 1. Biogeocenoses and their components / R.V. Kovalev (ed.). Institute of Soil Science and Agrochemistry. Novosibirsk: Nauka Publ., Siberian Branch, 1974. 307 p. (in Russian).

The structure, functioning and evolution of the Baraba biogeocenosis system. Vol. 2. Biogeocenotic processes / R.V. Kovalev (ed.). Institute of Soil Science and Agrochemistry. Novosibirsk: Nauka Publ., Siberian Branch, 1976. 495 p. (in Russian).

Tyumentsev N.F., Gadzhiev I.M., Chernikova M.I., Teplova G.H. Soil properties of Western Siberia. In book: Specificity of soil formation in Siberia. Novosibirsk: Nauka Publ., Siberian Branch, 1979. P. 53–60. (in Russian).

Meyer B.C., Schreiner V., Smolentseva E.N., Smolentsev B.A. Indicators of desertification in the Kulunda Steppe in the south of Western Siberia. Archives of Agronomy and Soil Science. 2008. Vol. 54. No. 6. P. 585–603. <https://doi.org/10.1080/03650340802342268>

Received 20 June 2025

Accepted 25 June 2025

Published 04 July 2025

About the authors:

Natalia A. Sokolova – Candidate of Biological Sciences, Head of the Laboratory of Soil Geography and Genesis, Institute of Soil Science and Agrochemistry, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); nasokolova30@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8927-4280>

Boris A. Smolentsev – Candidate of Biological Sciences, Leading Researcher in the Laboratory of Soil Geography and Genesis in the Institute of Soil Science and Agrochemistry, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); smolentsev.b@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9749-8233>

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/)