

ISSN 2618-6802 (online)



Почвы и окружающая среда

Научный журнал

Том 7. Выпуск 1

2024

<https://soils-journal.ru>

The Journal of Soils and Environment

Scientific Journal

Volume 7. Issue 1

2024



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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор:

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

Заместители главного редактора:

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

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

Члены редколлегии:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Заведующая редакцией:

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

Ответственный секретарь:

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

Научный редактор:

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

Выпускающий редактор:

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

Журнал основан	в 2018 году
Варианты названия	Почвы и окружающая среда (Počvy i okružaúšaa 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).

© 2024 ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН

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

EDITORIAL BOARD

Editor-in-Chief:

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

Editors:

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

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

Members of the Editorial Board:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Head of the Editorial Board:

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

Executive Secretary:

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

Scientific Editor:

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

Commissioning Editor:

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

The journal was launched	in 2018
Variants of the name	Почвы и окружающая среда (Pochvy i okruzhâushââ 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

Содержание

Плодородие почв и минеральное питание растений

- Капустянчик С.Ю., Якименко В.Н.** Оценка длительного воздействия культуры *Miscanthus sacchariflorus* на свойства почвы e241

Теоретические и прикладные проблемы почвоведения

- Дергачева М.И., Бажина Н.Л., Шейнкман В.С., Седов С.Н.** Гумусовая составляющая подседиментов конца сартанского криохрона в бассейне реки Надым (Западная Сибирь) e263

Генезис, экология и география почв

- Данилова А.А., Данилов П.П., Макаров В.С., Винокуров А.А.** Некоторые биологические особенности почв Куйдусунской впадины Оймяконского Нагорья e245

- Чевычелов А.П., Собакин П.И., Кузнецова Л.И.** Географо-генетические особенности почвообразования и разнообразие мерзлотных почв Центральной Якутии e233

- Шпедт А.А., Злотникова В.В., Емельянов Д.В.** Характеристика природно-ресурсного потенциала земледельческой зоны Красноярского края e235

Почвенно-физические процессы, свойства и режимы

- Синюткина А.А., Оленникова А.В., Сун-зу-ли Л.Ю., Гашкова Л.П.** Трансформация торфяной залежи и накопление углерода на постпирогенных верховых болотах таёжной зоны Западной Сибири e246

- Кравцов Ю.В.** Влияние многолетней динамики уровня грунтовых вод на зимнее перераспределение влаги в пахотных почвах Ишимской степи e250

- Кудряшова С.Я., Чумбаев А.С., Курбатская С.С.** Картографические модели температурных полей почв степных котловин Хакасии и Тывы на основе совместного анализа наземных и спутниковых данных e240

Биогеохимия, загрязнение и ремедиация объектов окружающей среды

- Гурьев Н.Е., Синдирева А.В., Чистякова Н.Ф., Ткаченко Н.С.** Особенности аккумуляции селена в ландшафтах Калининского административного округа города Тюмени e243

Обзоры, дискуссии, памятные даты

- Чекусов М.С., Бойко В.С.** Прошлое, настоящее и будущее аграрной науки в Омском Прииртышье e257

Contents

Soil Fertility and Mineral Nutrition

- Kapustyanchik S.Y., Yakimenko V.N.** Assessment of the long-term effect of *Miscanthus sacchariflorus* growth on soil properties e241

Fundamental and Applied Soil Science

- Dergacheva M.I., Bazhina N.L., Sheinkman V.S., Sedov S.N.** Humus component of pedosediments at the end of the Sartan cryochron in the Nadym River basin (West Siberia) e263

Soil Genesis, Ecology and Geography

- Danilova A.A., Danilov P.P., Makarov V.S., Vinokurov A.A.** Some biological properties of the Kuidusun depression soils of Oymyakon. e245

- Chevychelov A.P., Sobakin P.I., Kuznetsova L.I.** Geographical and genetic features of soil formation and diversity of the permafrost soils of Central Yakutia e233

- Shpedt A.A., Zlotnikova V.V., Emelyanov D.V.** Characterization of the natural resource potential of the agricultural zone of the Krasnoyarsk territory e235

Soil Physical Processes, Properties and Regimes

- Sinyutkina A.A., Olennikova A.V., Sun-zu-li L.Y., Gashkova L.P.** Transformation of peat deposits and carbon accumulation in post-pyrogenic raised bogs within the taiga zone of West Siberia e246

- Kravtsov Y.V.** The influence of long-term dynamics of groundwater levels on the winter redistribution of moisture in arable soils of the Ishim steppe e250

- Kudryashova S.Ya., Chumbaev A.S., Kurbatskaya S.S.** Cartographic models of temperature fields of soils in the steppe basins of Khakassia and Tuva based on a joint analysis of temperature monitoring of ground-based and satellite data e240

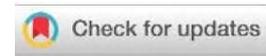
Environment Biogeochemistry, Pollution and Remediation

- Guriev N.E., Sindireva A.V., Chistyakova N.F., Tkachenko N.S.** Selenium accumulation in the landscapes of Tyumen City (the case of Kalininsky Administrative District) e243

Reviews, Discussions and Memoria

- Chekusov M.S., Boyko V.S.** Past, present and future of agricultural science in the Omsk Near-Irtysh region e257

УДК 631.4

<https://doi.org/10.31251/pos.v7i1.241>

Оценка длительного воздействия культуры *Miscanthus sacchariflorus* на свойства почвы

© 2024 С. Ю. Капустянчик ¹, В. Н. Якименко ²

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

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

Цель исследования. Оценить воздействие разновозрастных посадок *Miscanthus sacchariflorus* сорт Сорановский на свойства серой лесной почвы в условиях лесостепи Западной Сибири.

Место и время проведения. Экспериментальная часть исследований выполнялась в 2018–2020 гг. на научной экспериментальной базе ИЦиГ СО РАН (г. Новосибирск).

Методы. Использовали методы полевого опыта, химического, физического анализа почвенных и растительных образцов по общепринятым методикам. Статистическую значимость различий вариантов оценивали по наименьшей существенной разнице на уровне $p \leq 0,05$.

Основные результаты. Исследования показали, что разновозрастные посадки *Miscanthus sacchariflorus* позволяют получать 12–15 т сухой массы с 1 га в течение 14 и более лет без снижения урожайности. Подтверждена способность *Miscanthus sacchariflorus* эффективно произрастать на почвах с низким уровнем плодородия: за 11 лет произрастания *Miscanthus* на почве лёгкого гранулометрического состава содержание в ней гумуса возросло на 0,3–0,4%.

Заключение. Результаты проведённых исследований показали, что культура *Miscanthus* обладает широкими адаптационными возможностями применительно к малоплодородным землям, препятствуя их прогрессирующей деградации, улучшая эколого-агрохимическое состояние экосистемы и обеспечивая агрономическую целесообразность производства. Посадки *Miscanthus* оказывают благоприятное средообразующее влияние на низкоплодородные почвы, благодаря обогащению их элементами минерального питания, улучшению гумусного и структурного состояния.

Ключевые слова: *Miscanthus sacchariflorus* сорт Сорановский; серая лесная почва; продуктивность; структура почвы; водоустойчивость агрегатов.

Цитирование: Капустянчик С.Ю., Якименко В.Н. Оценка длительного воздействия культуры *Miscanthus sacchariflorus* на свойства почвы // Почвы и окружающая среда. 2024. Том 7. № 1. e241. DOI: [10.31251/pos.v7i1.241](https://doi.org/10.31251/pos.v7i1.241)

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время актуальны проблемы нерационального землепользования – увеличиваются процессы эрозии почв, их засоления, уплотнения, потери почвенного органического углерода. Современные оценки свидетельствуют, что площадь таких почв составляет почти 2 млрд га в мире. В России сельскохозяйственные угодья занимают около 220 млн га (~13% ее площади), из них пахотные – около 122 млн га. При этом, больше половины пахотных почв (58%) подвержены сильной водной и ветровой эрозии, переувлажнены, заболочены или засолены. Вынос питательных элементов из почвы за счёт сельскохозяйственной деятельности ежегодно в 3 раза превышает их возврат с вносимыми удобрениями, что обуславливает очевидную необходимость определенных усилий и затрат на поддержание почвенного плодородия. Кроме того, в связи с экономическим кризисом начала 90-х годов XX века более 1/4 сельскохозяйственных земель в РФ было «заброшено», сократив тем самым площадь сельхозугодий примерно на 34 млн га. Нарастающее перманентное антропогенное воздействие на почвы явно свидетельствует о необходимости и актуальности мониторинга и оптимизации их экологического состояния.

В этой связи последние годы активно ведутся поиски путей эффективного использования растений фиторемедиантов, положительно влияющих на химические, физико-химические и физические свойства почвы (Капустянчик, Якименко, 2020). К таким растениям относят, в том числе, и мискантус (*Miscanthus*). В России *Miscanthus* выращивали для посадки на берегах засыхающих озёр с целью спасения озерной флоры и фауны и очистки воды, для борьбы с эрозией почв (против образования оврагов) (Сакович и др., 2018). Возможность выращивания этого многолетнего злака на

загрязнённых почвах и использование его биомассы с целью получения биотоплива делает это растение весьма перспективным в хозяйственной деятельности России (Зеленова и др., 2021).

Целью нашего исследования было оценить воздействие разновозрастных посадок *Miscanthus sacchariflorus* сорт Сорановский на свойства серой лесной почвы в условиях лесостепи Западной Сибири.

Задачи: сравнить продуктивность разновозрастных посадок *M. sacchariflorus*; проанализировать изменение эффективного плодородия почвы при длительном выращивании *M. sacchariflorus*; изучить структурное состояние почв в разновозрастных посадках *M. sacchariflorus*.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования с разновозрастными посадками *Miscanthus sacchariflorus* проводились на полях экспериментального хозяйства ИЦиГ СО РАН, заложенного в 70-х годах прошлого века и расположенного в правобережье Новосибирского водохранилища (г. Новосибирск, 54°50'42,6"N, 83°07'43,1E"). Почвенный покров опытных полей составляют серые лесные и дерново-подзолистые почвы, небольшие участки которых в естественном, целинном состоянии сохранились по опушкам окружающих поля сосново-берёзовых и берёзовых лесов. Серые лесные почвы относятся к зональным почвам северной лесостепи Новосибирского Приобья. Они составляют основу почвенного покрова третьей надпойменной террасы р. Оби и склонов лесового плато, формируются на повышенных формах рельефа восточной части Академгородка (г. Новосибирск) под берёзовыми лесами и остепенёнными лугами. Многолетнее сельскохозяйственное использование данных почв привело к существенному снижению их эффективного плодородия, уменьшению содержания питательных элементов и гумуса (Сысо и др., 2010).

Объект исследования: *Miscanthus sacchariflorus* сорт Сорановский (оригинатор — Институт цитологии и генетики СО РАН) включён в Государственный реестр селекционных достижений в 2012 г. (свидетельство № 58540) и допущен к возделыванию на всей территории РФ с 2013 г.

Рассматриваемый опыт представлял собой поле площадью 1 га с разновозрастными плантациями *M. Sacchariflorus*, 2005, 2009 и 2015 годов посадки (Капустянчик, Бурмакина, 2020). Участки с *M. sacchariflorus* (полосы 50×20 м) чередуются с такими же участками бессменного пара, служившего в качестве контроля. Повторность опыта 4-кратная. Исследования проводили в 2018–2020 гг. В качестве посадочного материала использовали корневища *M. Sacchariflorus*, сорт Сорановский. Корневища высаживали в мае (посадочная норма 1,4 т/га) вручную в борозды глубиной 20–25 см, расстояние между бороздами 70 см; далее поверхность выравнивалась и прикатывалась. В связи с необходимостью выявления средообразующих возможностей мискантуса, удобрения в опыте не применялись. *M. sacchariflorus* убирали сплошным скашиванием в начале октября при высыхании надземной биомассы; урожай учитывали выборочно отбором надземной биомассы с помощью рамки 0,25 м² в 4-кратной повторности.

Растительные образцы оценивали по абсолютно-сухой массе, которая определялась после сушки образцов в сушильном шкафу при температуре 105°C до достижения постоянной массы. Подземную биомассу учитывали в слое 0–25 см методом монолитов. Почвенные образцы отбирали после уборки надземной биомассы, из слоёв 0–20, 20–40, 40–60, 60–80, 80–100 см и анализировали общепринятыми методами: гумус – по Тюрину, рН – на потенциометре; агрегатный анализ почв проводили по методу Саввинова (сухое просеивание) (Самофалова, 2021). Для агрегатного анализа почв на вариантах опыта были выбраны методом конверта 5 площадок радиусом 5 м, в пределах которых с глубины 0–20 см отобраны образцы ненарушенного сложения размером 15×15×20 см. Такой подход позволил избежать искусственного перераспределения размерных фракций агрегатов (Холодов и др., 2019). Перед проведением анализа образцы были доведены до воздушно-сухого состояния. Сухое просеивание полученных образцов почв проводили по методу Саввинова с диаметром ячейки сит 0,25, 0,5, 1, 2, 3, 4, 5, 7 и 10 мм. Для определения водопрочности структуры почвы использовали прибор И.М. Бакшеева. Для анализа были взяты фракция размером >10 мм, агрегаты 10–7, 7–5 и 5–3 мм. По результатам сухого и мокрого просеивания рассчитаны средневзвешенные диаметры сухих и водоустойчивых агрегатов почв. Структуру почвы оценивали по следующим показателям: 1) содержание агрономически ценной структуры почвы; 2) коэффициент структурности ($K_{стр}$); 3) определение количества водопрочных агрегатов по классификации И.В. Кузнецовой (Белоусова, 2022); 4) оценка агрономически ценной структуры по С.И. Долгову и П.У. Бахтину по отношению результатов сухого и мокрого просеивания.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Продуктивность разновозрастных посадок *M. sacchariflorus*. Плантация *M. sacchariflorus* формируется по следующим этапам: после высадки корневищ *M. sacchariflorus* в первый год происходит активное формирование корневой массы за счёт роста и развития ризом и формирования подземных узлов. Продуктивность подземной биомассы составила $2,6 \pm 0,4$ т/га, преобладая над надземной, которая имела значения $0,8 \pm 0,2$ т/га (табл. 1). В течение второго и третьего года развития культуры происходило активное нарастание как надземной, так и подземной биомассы: урожайность надземной массы культуры составила 8,1–10,7 т/га, подземной – 4,0–8,9 т/га. На третий год вегетации продуктивность культуры имела значения $10,7 \pm 2,2$ т/га и в последующие годы сохранялась на этом уровне. Максимальный прирост корневищ отмечен в 2018 г., однако он существенно не отличался от прироста в 2017 и 2019 гг. Корневая система в виде ризом развивалась на глубину почвы 20–25 см, в нижележащих слоях 20–50 см располагаются сосущие корни, масса которых составляет почти 30% всей корневой системы. Отмечено уменьшение количества корней с глубиной, т.е. плотность корневой системы является самой высокой в верхнем слое почвы (Якименко и др., 2021; Капустянчик, 2023). Таким образом, формирование плантации *M. sacchariflorus* на малопродуктивных почвах происходит к третьему году вегетации (рис. 1).

Таблица 1

Продуктивность *M. sacchariflorus* 2015 года посадки (г. Новосибирск) и содержание углерода в биомассе

Год определения	Биомасса, т абсолютно сухого вещества/га		Общая биомасса, т/га
	надземная	подземная (в слое почвы 0–25 см)	
2015	$0,8 \pm 0,2^*$	$2,6 \pm 0,4$	3,4
2016	$8,1 \pm 2,1$	$4,0 \pm 0,9$	12,1
2017	$10,7 \pm 2,2$	$8,9 \pm 1,4$	19,6
2018	$10,8 \pm 1,3$	$9,7 \pm 1,3$	20,5
2019	$10,2 \pm 1,2$	$9,1 \pm 2,1$	19,3
Содержание С, %	$44,7 \pm 1,5$	$43,0 \pm 1,4$	43,8
Содержание С, т/га	$4,5 \pm 1,1$	$3,9 \pm 2,0$	8,4

Примечание.

*Здесь и далее в табл. 2, 4, 6 представлены среднее арифметическое и стандартное отклонение ($M \pm SEM$).



Рисунок 1. Сформированная трехлетняя плантация *M. Sacchariflorus* сорт Сорановский.

Закономерности распределения и роста корней у многолетних растений, таких как *Miscanthus*, недостаточно известны. Не существует общепринятого метода оценки корневых систем многолетних травянистых растений. Основными трудностями являются отделение корней текущего года от корней, созданных в предыдущие годы, а также выявление различий между живыми и мёртвыми корнями. Поэтому в полевом исследовании корневой системы *Miscanthus* в конце вегетации 2018 г. провели оценку корневого распределения и определения плотности корневой системы на глубине 0–100 см с использованием метода горизонтальной раскопки корневых систем. Верхний 20-см слой почвы содержит 50% подсчитанных корневищ и корней. Соотношение корневищ к корням составило 1:1 при

их общей массе 4,4 кг (влажность 65%). Было отмечено интенсивное ветвление корневищ и формирование большого количества подземных узлов. Так, на 1 м² наблюдалось 95 основных корневищ с общей длиной 2677 см и 140 боковых корневищ. Важным показателем при оценке подземного банка вегетативных органов является подземный меристематический потенциал – это количество узлов (меристематических очагов) на подземных побегах. Число узлов на подземных побегах в наших исследованиях составило 66 шт./м², что говорит о хорошем потенциале культуры. В нижележащих слоях корневища не обнаруживаются, на глубине 20–50 см обнаружены сосущие корни, масса которых составляет почти 30% всех подсчитанных корней и корневищ. Отмечено уменьшение количества корней с глубиной. В целом, результаты нашего исследования подтверждают результаты других исследователей о том, что плотность корневой системы является самой высокой в верхнем слое почвы (Mann et al., 2013).

Продуктивность культуры на малоплодородных почвах формируется как за счёт надземной, так и подземной части, что отличает *Miscanthus* от естественной травяной растительности, где наибольшие запасы биомассы (до 50–60 т/га) относятся к подземной части растений (Титлянова и др., 2018). Следствием этого является пропорциональное поступление органического вещества в почву с подземной и надземной биомассой. Так, среднее содержание углерода в надземной биомассе *M. Sacchariflorus* в 2019 году (пятилетняя плантация) составило 44,7% или 4,5 т/га; в подземной биомассе в слое почвы 0–25 см – 43,0% или 3,9 т/га. Среднее содержание углерода в общей биомассе составило 43,8% или 8,4 т/га.

Оценивая биометрическую характеристику разновозрастных посадок *M. Sacchariflorus*, проведённую в 2018 г. (табл. 2), можно отметить, что высота растений, измеренная от основания стебля до конца самого длинного листа, оцененная после окончания вегетационного периода (3 декада сентября – 1 декада октября), варьировала в пределах 180–229 см при средней величине 201 см. Причём максимальная высота растений отмечена на делянках 2015 года посадки и составляла 211 см. Число междоузлий на генеративных стеблях не отличались и составили значение 10 штук на одном побеге.

Таблица 2

Характеристика надземной биомассы разновозрастных посадок *M. Sacchariflorus*, 2018 год (г. Новосибирск)

Год посадки	Длина генеративного побега, см	Густота стеблестоя, шт./м ²	Число междоузлий на главном побеге, шт.	Облиственность, %	Продуктивность (уборка осенью), т/га	Продуктивность (уборка весной следующего года), т/га
2005	194,0±13,3	223,0±7,0	10,0±1,0	42,0±1,2	12,4±1,6	6,7±1,2
2009	200,0±2,4	302,0±8,0	10,0±1,0	43,0±2,3	14,3±1,4	8,2±1,1
2015	211,0±17,7	202,0±8,0	10,0±1,0	41,0±0,9	10,8±1,3	5,7±0,8

Важным качественным показателем культуры является соотношение листьев и стеблей. Облиственность на сформированных плантациях, независимо от возраста посадок, варьировала в пределах 41–43%, то есть оценка компонентов урожайности позволила установить, что преобладающей частью у *M. Sacchariflorus* является стебель.

Густота стеблестоя имела значения от 193 до 310 шт./м² при среднем значении 251 шт./м². Максимальная густота стеблестоя отмечена на делянках 2005 и 2009 годов посадки (223 и 302 шт./м², соответственно), что отразилось на урожайности культуры: наибольшая продуктивность *M. Sacchariflorus* получена на этих делянках. Результаты исследований свидетельствуют об отсутствии значительных различий урожайности культуры в зависимости от возраста плантации, по крайней мере, в течение 10–14 лет ее функционирования, что доказывает возможность длительного бессменного выращивания культуры (Якименко и др., 2021; Капустянчик, 2023).

Влажность биомассы *M. Sacchariflorus*, убранной осенью составляла 20–23% и не отличалась от влажности биомассы, собираемой ранней весной. Данное свойство позволяет хранить собранную биомассу без дополнительной сушки.

В отличие от влажности, количество надземной биомассы существенно зависит от времени сбора урожая. На территории зарубежных стран уборка культуры может проводиться в осеннее, зимнее и весеннее время, в континентальных условиях Сибири – осенью или весной следующего года. В зарубежных исследованиях (Zub et al., 2011; Dohleman et al., 2012) при сборе урожая осенью значения продуктивности возрастают в 1,5 раза для *M. Sacchariflorus*. В наших исследованиях также отмечена

более высокая урожайность при уборке осенью (рис. 2); в среднем урожайность осенью составляла 12,5 т/га, весной – 6,8 т/га, что связано с потерей листьев и части стеблей к весеннему периоду. К потерям также относят пожнивные остатки при уборке (стерня), которые составляют в среднем от 0,5 до 2,5 т/га сухого вещества. Таким образом, продуктивность *M. Sacchariflorus*, складывающаяся из надземной и подземной биомассы, во многом определяется влиянием биотических (агротехнических) факторов.



Рисунок 2. Осенняя уборка надземной биомассы *M. Sacchariflorus* сорт Сорановский.

Изменение эффективного плодородия почвы на разновозрастных посадках *M. sacchariflorus*. Исследуемые почвы в естественном состоянии обладают невысоким уровнем плодородия (Сысо и др., 2010). Так, содержание гумуса в исходной почве составляло 1,0–1,1% и не изменялось во все последующие годы. Выращивание *M. sacchariflorus* в течение 11 лет способствовало повышению содержания гумуса в почве агроценоза (табл. 3), как по сравнению с исходной старопашотной почвой, так и соседним парующимся участком. Отметим, что количество гумуса в почве под *M. sacchariflorus* возросло не только в верхнем, но и в нижележащих почвенных слоях. Реакция почвенного раствора при длительном выращивании *M. sacchariflorus* не изменилась по сравнению, как с исходной старопашотной почвой, так и с почвой сопутствующего пара; рН водной суспензии везде равнялась 5,75.

Таблица 3

Содержание гумуса в почве опыта после 11 лет выращивания *M. sacchariflorus* (делянки 2009 года посадки, отбор почвенных образцов в 2019 году)

Слой почвы, см	<i>M. sacchariflorus</i>	Пар
0–20	1,37	0,96
20–40	1,08	0,79
40–60	0,53	0,41
60–80	0,37	0,23
80–100	0,31	0,21
НСП ₀₅	0,15	

В целом, исследования показали очевидную перспективность выращивания *M. sacchariflorus* на низко продуктивных землях, препятствуя их прогрессирующей деградации, улучшая эколого-агрохимическое состояние агроценозов и обеспечивая агрономическую целесообразность производства.

Агроэкологическая оценка структурного состояния почв в разновозрастных посадках *M. sacchariflorus*. Структуру почвы оценивают количественно по распределению почвенных агрегатов на фракции определенного размера (диаметра); для разделения этих фракций проводят ситовой анализ.

Оценка структуры почвы методом сухого просеивания по Н.И. Саввинову. В опыте на разновозрастных посадках *M. sacchariflorus* структурно-агрегатный состав почвы в слое 0–20 см определялся в 2020 г., что соответствует 16-му, 12-му и 6-му годам после закладки опытов 2005, 2009 и 2015 годах (табл. 4).

Наибольшая структурность почвы отмечена под *M. sacchariflorus* 2005 г. посадки – показатели содержания ценных структур (10–0,25 мм) были высокими и составляли в слое почвы 0–20 см 69–72%. На участке 2009 г. посадки значения сохранялись в пределах 63–65%, 2015 г. посадки – 56–59%. На парующемся участке при ежегодной вспашке показатели были самыми низкими и составили 46–48%. Наши результаты подтверждаются исследованиями Я.Т. Суюндукова с соавторами (2016) по изучению трав естественной степи, в которых показатель содержания агрономически ценных структур составлял 70–85%.

Таблица 4

Агрегатный состав серой лесной супесчаной почвы под разновозрастными посадками *M. sacchariflorus* в слое 0–20 см (результаты сухого просеивания по методу Саввинова)

Вариант	Размеры структур (мм), содержание (%)								
	>10	10–7	7–5	5–3	3–2	2–1	1–0,5	0,5–0,25	<0,25
2005 г.	25,7±1,8	12,6±0,9	10,6±0,85	13,3±0,4	9,7±0,4	16,0±0,1	3,6±0,9	4,7±0,4	3,7±0,4
2009 г.	26,0±1,3	11,9±1,0	10,1±0,1	12,9±0,4	8,5±0,7	12,2±0,7	4,0±1,0	5,0±1,2	9,0±0,4
2015 г.	29,2±0,5	11,5±0,9	8,6±0,5	11,7±0,4	6,2±0,7	9,7±0,6	3,1±0,5	6,3±0,5	13,1±1,8
пар	40,3±1,2	13,7±0,7	7,7±0,5	10,5±1,4	6,1±1,3	3,3±1,2	2,0±0,7	3,6±0,1	12,8±0,7

Наши исследования структурного состава почв показали значительные колебания значений агрономически ценных структур в зависимости от возраста посадок (см. табл. 4). Некоторые авторы (Ковда, 1973) относят к самым ценным агрегатам размером 5–1 мм. В наших опытах наиболее высокое количество агрегатов данной фракции отмечено под *M. sacchariflorus* 2005 г. посадки (39%); почва под паром имела наименьшее содержание таких агрегатов (20%). Максимальная доля глыбистой фракции (>10 мм), являющейся показателем ухудшения структуры, отмечена в почве под паром; под посадками *M. sacchariflorus* на всех вариантах отмечалась наименьшая глыбистость. Наибольшая распыленность структурных агрегатов (менее 0,25 мм) наблюдалась на участке под паром и почвах под *M. sacchariflorus* 2015 года посадки.

Важным показателем качества структуры является **коэффициент структурности ($K_{стр}$)**, рассчитываемый как отношение количества агрономически ценных агрегатов к агрономически не ценным. Для качественной оценки структуры использовали агрономически ценный диапазон 10–0,25 мм и $K_{стр}$ (табл. 5). Результаты оценки структуры показали, что структурное состояние почвы под *M. sacchariflorus* на более возрастных участках (2005 и 2009 гг.) характеризовалось как хорошее, на участке под паром и с *M. sacchariflorus* 2015 г. посадки – как удовлетворительное.

Таблица 5

Оценка структурного состава почв (оценка сухого просеивания проведена по методу Саввинова)

Вариант опыта	Содержание агрономически ценных агрегатов (размер структур 10–0,25 мм), %	Коэффициент структурности ($K_{стр}$)	Оценка агрегатного состояния
2005	71	2,40	хорошее / хорошее
2009	64	1,77	хорошее / хорошее
2015	58	1,21	удовлетворительное / удовл.
пар	47	0,98	/ удовл. / удовл.

Примечание.

В оценке агрегатов через дробь записаны показатели содержания структурных отдельностей / показатели коэффициентов (классификация приведена по: Белоусова, 2022).

Таким образом, сухой рассев показал, что в корнеобитаемом слое *M. sacchariflorus* (0–20 см) было выявлено значительное содержание (свыше 58%) агрегатов агрономически ценной фракции. Агроэкологическая оценка по результатам сухого просеивания позволяет считать, что структурное состояние почвы под *M. sacchariflorus* на более возрастных посадках (2009 и 2005 годы посадки) практически восстановилось до естественных целинных характеристик.

Оценка водоустойчивости агрегатов. Важным показателем структуры почвы является ее водоустойчивость или водопрочность, т.е. способность агрегатов противостоять разрушению при воздействии воды. Почвы, имеющие водопрочную структуру, обладают благоприятным для развития растений водно-воздушным режимом, хорошо впитывают влагу и воздух, не подвергаются

воздействию эрозионных процессов. Оценка водопрочности осуществлялась прибором И.М. Бакшеева (метод качания сит). Мокрое просеивание показало, что водопрочность агрегатов достаточно выровнена по вариантам опыта и колеблется в пределах от 50 до 83% (табл. 6). Формированию структуры с повышенной водопрочностью способствовали многолетние посадки *M. sacchariflorus* (2005 и 2009 гг.).

Таблица 6

Оценка различными методами водопрочности структуры под разновозрастными посадками *M. sacchariflorus* в слое почвы 0–20 см (результаты просеивания по методу Саввинова)

Вариант	Размеры структур 10-0,25 мм при сухом просеивании, содержание (%)	Размеры структур >0,25 мм при мокром просеивании, содержание (%)	Оценка по И.В. Кузнецовой	Оценка по Долгову С.И. и Бахтину П.У.
2005 г.	70,6±2,4	83,2±1,9	избыточно высокая	отличная
2009 г.	64,0±1,8	82,3±1,3	избыточно высокая	отличная
2015 г.	57,6±1,2	65,8±1,8	отличная	хорошая
пар	46,9±0,9	50,4±2,0	хорошая	удовл.

Примечание.

Классификация оценки агрегатного состояния предложена И.В. Кузнецовой (Белоусова, 2022).

Для большей информативности показателя оценки водопрочности, его расчёт был произведён различными методами (см. табл. 6). Согласно полученным данным, наиболее чувствительными критериями оказались коэффициенты оценки по И.В. Кузнецовой, а также по С.И. Долгову и П.У. Бахтину, показывающие наибольшую информативность оценки водопрочности структуры. Водопрочность агрегатов закономерно ухудшается в направлении от возраста посадок к пару: под старыми посадками *M. sacchariflorus* водопрочность оценивается на «отлично», под паром «удовлетворительно». За 16-летний период произошло значительное увеличение содержания агрономически ценных агрегатов, хотя и на 9-ый, и 6-ой годы произрастания *M. sacchariflorus* значения структурного состава почвы остаются в пределах категории хорошее. Почва под паром характеризуется повышенной глыбистостью и распылённостью.

ОБСУЖДЕНИЕ

Изучению продуктивности *M. sacchariflorus* посвящён ряд зарубежных исследований. Многие авторы (Zub et al., 2011; Gauder et al., 2012) отмечают низкую продуктивность надземной биомассы – от 6 до 26 т/га. В других исследованиях (Dohleman et al., 2012) приводят более высокую продуктивность (38 т/га) по сравнению с результатами, полученными в наших исследованиях. Такое варьирование в урожайности надземной биомассы можно объяснить разными агроэкологическими условиями, видами *Miscanthus* и сроками уборки, так как зимняя и весенняя уборка биомассы способствовала снижению уровня урожайности за счёт старения и опадения листьев и стеблей.

Что касается подземной биомассы, то у ряда исследователей в Европе и США, определён диапазон продуктивности подземной биомассы от 6 до 13 т/га (Dohleman et al., 2012; Christensen et al., 2016). Отмечены и более высокие значения, достигающие 25–27 т/га на глубине до 25 см, а при использовании полива – до 37 т/га (Mann et al., 2013; Christensen et al., 2016). В наших исследованиях продуктивность подземной биомассы была невысокой (8–9 т/га) по сравнению с зарубежными исследователями. Огромную роль в приросте корневой системы играют абиотические и биотические факторы.

Содержание углерода в надземной биомассе варьировало от 43 до 49%, в зависимости от видовой принадлежности и агроэкологических условий местности (Khodier et al., 2012; Carvalho et al., 2017; Bilandžija et al., 2021; 2022). Эти результаты соответствуют нашим данным (45% для надземной и 43% для подземной биомассы в слое 0–20 см), полученным в условиях лесостепи Новосибирского Приобья. Корневая система в виде корневищ и корней учитывалась только на глубине 0–25 см. Часть корневой системы, расположенная ниже 25 см и представляющая собой корни, не учтена и, возможно, запасы углерода в подземной биомассе выше, чем то, что определено нами.

Повышение плодородия почвы является важным аспектом её экологического восстановления за счёт выращивания *Miscanthus*. Органическое вещество почвы играет центральную роль в поддержании

ее плодородия, поскольку оно выполняет жизненно важные функции экосистемы, такие как формирование почвенной структуры. Известно, что выращивание *Miscanthus* может увеличить запасы органического углерода в почве (Chen et al., 2020; Zhao Q. et al., 2020; Xu Yi et al., 2021). В зарубежных исследованиях был показан почвоулучшающий эффект от выращивания *Miscanthus* за 4 года вегетации (Xu Yi et al., 2021). В наших исследованиях также установлена закономерность изменения качества почвы при использовании *Miscanthus*. *Miscanthus* является многолетним растением и обычно ему требуется несколько лет, чтобы достичь максимальной урожайности. После 3 лет выращивания (после посадки) урожай надземной биомассы культуры достигает максимального значения. Тем не менее, потенциал *Miscanthus* для улучшения почвы все ещё может увеличиваться благодаря продолжающемуся росту подземных корней и корневищ. Было обнаружено, что соотношение корневой системы и надземных побегов *Miscanthus* увеличивается с возрастом насаждения из-за того, что со временем в подземные слои попадает больше биомассы (Zhao S. et al., 2020; Zhao Q. et al., 2020.).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в многолетних полевых исследованиях установлена эффективная возможность выращивания *M. sacchariflorus* в лесостепи Новосибирского Приобья: ежегодная урожайность составляла 10–15 т сухой массы с 1 га. Показана возможность бесменного выращивания культуры на одном участке в течение 14 и более лет без снижения урожайности; подтверждена способность *M. sacchariflorus* эффективно произрастать на почвах с низким уровнем плодородия. Длительное (более 14 лет) выращивание культуры на малоплодородных почвах привело к увеличению накопления органической массы, улучшению гумусного состояния почв в процессе функционирования агроценоза и положительно отразилось на почвенной структуре. За 11 лет бесменного выращивания *M. sacchariflorus* на почве лёгкого гранулометрического состава содержание в ней гумуса увеличилось на 0,3–0,4%; выявлена положительная средообразующая способность *M. Sacchariflorus*, позволившая заметно улучшить физические свойства почвы исследуемого участка.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа профинансирована Министерством науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственных заданий Сибирского научно-исследовательского института растениеводства и селекции – филиала ИЦиГ СО РАН (проект № FWNR-2022-0018) и Института почвоведения и агрохимии СО РАН (проект № 121031700309-1).

ЛИТЕРАТУРА

- Белоусова Е.Н. Лабораторный практикум по агрономической химии. Красноярск: Красноярский государственный аграрный университет, 2022. 259 с.
- Зеленова Н.А., Муратова А.Ю., Плешакова Е.В. Выделение из корневой зоны *Miscanthus giganteus* ризобактерий, проявляющих устойчивость к тяжелым металлам и стимулирующей рост растений // Биохимия, физиология и биосферная роль микроорганизмов: сборник тезисов конференции (Пушино, 6–9 декабря 2021 г.) / Т.А. Решетилова (отв. ред.). Москва: ООО «Издательство ГЕОС», 2021. С. 61–63.
- Капустянчик С.Ю. Влияние посадок мискантуса на свойства серой лесной супесчаной почвы // Почвы и окружающая среда [Электронный ресурс]: Сборник научных трудов Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 55-летию Института почвоведения и агрохимии СО РАН (Новосибирск, 2–6 октября 2023 г.). Новосибирск: ИПА СО РАН, 2023. С. 285–291. DOI: <https://doi.org/10.31251/conf1-2023>.
- Капустянчик С.Ю., Бурмакина Н.В., Якименко В.Н. Оценка эколого-агрохимического состояния агроценоза с многолетним выращиванием мискантуса в Западной Сибири // Агрохимия. 2020. № 9. С. 65–73. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002188120090082>.
- Капустянчик С.Ю., Якименко В.Н. Мискантус – перспективная сырьевая, энергетическая и фитомелиоративная культура (литературный обзор) // Почвы и окружающая среда. 2020. Том 3. № 3. с.126. DOI: <https://doi.org/10.31251/pos.v3i3.126>.
- Ковда В.А. Основы учения о почвах. Москва: Наука, 1973. Кн. 2. 468 с.
- Сакович Г.В., Михайлов Ю.М., Будаева В.В., Корчагина А.А., Гисматулина Ю.А., Козырев Н.В. Нитраты целлюлозы из нетрадиционных видов сырья // Доклады академии наук. 2018. Том 483. № 3. С. 283–287. DOI: <https://doi.org/10.31857/S086956520003249-6>.
- Самофалова И.А., Лобанова Е.С. Почвоведение: лабораторный практикум. Пермь: ИПЦ «Прокрость», 2021. 139 с.

- Суюндуков Я.Т., Хасанова Р.Ф. Агроэкологический анализ структурного состояния и оптимизация свойств черноземов Зауралья при фитомелиорации / Б.М. Миркина (отв. ред.). Уфа: Гилем, Башк. энцикл., 2016. 240 с.
- Сысо А.И., Смоленцев Б.А., Якименко В.Н. Почвенный покров Новосибирского Академгородка и его агроэкологическая оценка // *Сибирский экологический журнал*. 2010. Том 17. № 3. С. 363–377.
- Титлянова А.А., Базилевич Н.И., Шмакова Е.И., Снытко В.А., Дубынина С.С., Магомедова Л.Н., Нефедьева Л.Г., Семенюк Н. В., Тишков А.А., Ти Тран, Хакимзянова Ф.И., Шатохина Н.Г., Кыргыз Ч.О., Самбуу А.Д. Биологическая продуктивность травяных экосистем. Географические закономерности и экологические особенности. 2-е издание, исправленное и дополненное. Новосибирск: ИПА СО РАН, 2018. 110 с.
- Холодов В.А., Ярославцева Н.В., Фарходов Ю.Р., Белобров В.П., Юдин С.А., Айдиев А.Я., Лазарев В.И., Фрид А.С. Изменение соотношения фракций агрегатов в гумусовых горизонтах черноземов в различных условиях землепользования // *Почвоведение*. 2019. № 2. С. 184–193. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0032180X19020060>.
- Якименко В.Н., Капустянчик С.Ю., Галицын Г.Ю. Возделывание мискантуса в континентальных регионах России // *Земледелие*. 2021. № 2. С. 27–31. DOI: <https://doi.org/10.24411/0044-3913-2021-10206>.
- Bilandžija D., Bilandžija N., Zgorelec Ž. Sequestration potential of energy crop *Miscanthus x giganteus* cultivated in continental part of Croatia // *Journal of Central European Agriculture*. 2021. Vol. 22. No. 1. P. 188–200. DOI: <https://doi.org/10.5513/JCEA01/22.1.2776>.
- Bilandžija D., Stuparić R., Galić M., Zgorelec Ž., Letoand J., Bilandžija N. Carbon Balance of *Miscanthus* Biomass from Rhizomes and Seedlings // *Agronomy*. 2022. Vol. 12. Iss. 6. P. 1426. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy12061426>.
- Carvalho J.L.N., Hudiburg T., Franco H.C.J., DeLucia E.H. Contribution of above- and belowground bioenergy crop residues to soil carbon // *Global Change Biology Bioenergy*. 2017. Vol. 9. Iss. 8. P. 1333–1343. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcbb.12411>.
- Chen Y., Tian W., Shao Y., Li Y.-J., Lin L.-A., Zhang Y.-J., Han H., Chen Z.-J. *Miscanthus* cultivation shapes rhizosphere microbial community structure and function as assessed by Illumina MiSeq sequencing combined with PICRUSt and FUNGUId analyses // *Archives of Microbiology*. 2020. Vol. 202. P. 1157–1171. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00203-020-01830-1>.
- Christensen B.T., Lærke P.E., Jørgensen U., Kandel T.P., Thomsen I.K. Storage of *Miscanthus*-derived carbon in rhizomes, roots, and soil // *Canadian Journal of Soil Science*. 2016. Vol. 96. No. 4. P. 354–360. DOI: <https://doi.org/10.1139/cjss-2015-0135>.
- Dohleman F.G., Heaton E.A., Arundale R.A., Long S.P. Seasonal dynamics of above- and below-ground biomass and nitrogen partitioning in *Miscanthus x giganteus* and *Panicum virgatum* across three growing seasons // *Global Change Biology Bioenergy*. 2012. Vol. 4. Iss. 5. P. 534–544. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1757-1707.2011.01153.x>.
- Gauder M., Graeff-Hönniger S., Lewandowski I., Claupein W. Long-term yield and performance of 15 different *Miscanthus* genotypes in southwest Germany // *Annals of Applied Biology*. 2012. Vol. 160. Iss. 2. P. 126–136. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2011.00526.x>.
- Khodier A., Hussain T., Simms N., Oakey J., Kilgallon P. Deposit formation and emissions from cofiring *Miscanthus* with Daw Mill coal: Pilot plant experiments // *Fuel*. 2012. Vol. 101. P. 53–61. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.09.029>.
- Mann J.J., Barney J.N., Kyser G.B., DiTomaso J.M. Root system dynamics of *Miscanthus x giganteus* and *Panicum virgatum* in response to rainfed and irrigated conditions in California // *BioEnergy Research*. 2013. Vol. 6. P. 678–687. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12155-012-9287-y>.
- Xu Yi, Zheng Ch., Liang L., Zili Yi, Xue Sh. Quantitative assessment of the potential for soil improvement by planting *Miscanthus* on saline-alkaline soil and the underlying microbial mechanism // *Global Change Biology Bioenergy*. 2021. Vol. 13. Iss. 7. P. 1191–1205. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcbb.12845>.
- Zhao C., Fan X., Li X., Hou X., Zhang W., Yue Y., Wu J. *Miscanthus sacchriflorus* exhibits sustainable yields and ameliorates soil properties but potassium stocks without any input over a 12-year period in China // *Global Change Biology Bioenergy*. 2020. Vol. 12. Iss. 8. P. 556–570. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcbb.12700>.
- Zhao Q., Bai J., Gao Y., Zhao H., Zhang G., Cui B. Shifts in the soil bacterial community along a salinity gradient in the Yellow River Delta // *Land Degradation and Development*. 2020. Vol. 31. Iss. 16. P. 2255–2267. DOI: <https://doi.org/10.1002/ldr.3594>.
- Zub H., Arnoult S., Brancourt-Hulmel M. Key traits for biomass production identified in different *Miscanthus* species at two harvest dates // *Biomass Bioenergy*. 2011. Vol. 35. Iss. 1. P. 637–651. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.10.020>.

Поступила 14.12.2023
Принята 03.02.2024
Опубликована 15.02.2024

Сведения об авторах:

Капустянчик Светлана Юрьевна – доктор сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник сектора интродукции и технологии возделывания сельскохозяйственных культур Сибирского научно-исследовательского института растениеводства и селекции – филиал «ФИЦ Институт цитологии и генетики СО РАН» (р.п. Краснообск, Новосибирская область, Россия); kapustyanchik@bionet.nsc.ru

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

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.



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

Assessment of the long-term impact of *Miscanthus sacchariflorus* culture on soil properties

© 2024 S. Yu. Kapustyanchik ¹, V. N. Yakimenko ²

¹*Siberian Research Institute for Plant Industry and Breeding, a Branch of the Federal Research Center Institute of Cytology and Genetics, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Krasnoobsk, Russia. E-mail: kapustyanchik@bionet.nsc.ru*

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

The aim of the study was to assess the effect of different-age plantations of *Miscanthus sacchariflorus* cv. Soranovsky on the gray forest soil properties in the forest-steppe of West Siberia, Russia.

Location and time of the study. The experimental part of the research was carried out at the Research Experimental Station of the Institute of Cytology and Genetics SB RAS (Novosibirsk) in 2018-2020.

Methodology. The methods employed in the study were the most common ones for chemical and physical analyses of soils and plant samples.

Results. Differently aged plantations of *Miscanthus sacchariflorus* allowed obtaining 12-15 tons of dry mass per 1 hectare for 14 or more years without reducing the productivity. *Miscanthus sacchariflorus* can grow effectively in soils with low fertility. The humus content in light-textured soil increased by 0.3-0.4% over 11 years of *Miscanthus* growth, as compared with the fallow soil. *Miscanthus sacchariflorus* plantations showed a positive environment-forming effect, favourably affecting ecological and agronomic soil properties of the agrocenoses.

Conclusions. *Miscanthus* has broad adaptation potential in relation to low-fertility lands, preventing their progressive degradation, improving the ecological and agrochemical state of the ecosystems and facilitating agronomic production. *Miscanthus* has a beneficial environment-forming effect on low-fertility soils by enriching them with mineral nutrients and improving their humus and texture condition.

Keywords: *Miscanthus sacchariflorus* cv. Soranovsky; gray forest soil; productivity; soil texture; water resistance of aggregates.

How to cite: Kapustyanchik S.Yu., Yakimenko V.N. Assessment of the long-term effect of *Miscanthus sacchariflorus* growth on soil properties. *The Journal of Soils and Environment*. 2024. 7(1). e241 (in Russian with English abstract). DOI: [10.31251/pos.v7i1.241](https://doi.org/10.31251/pos.v7i1.241)

FUNDING

The study was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (projects No. FWNR-2022-0018 and No. 121031700309-1).

REFERENCES

Belousova E.N. Laboratory workshop on agronomic chemistry. Krasnoyarsk: Krasnoyarsk State Agrarian University, 2022. 259 p. (in Russian).

- Zelenova N.A., Muratova A.Yu., Pleshakova E.V. Isolation of rhizobacteria from the root zone of *Miscanthus giganteus* that exhibit resistance to heavy metals and stimulate plant growth. In book: Biochemistry, physiology and the biosphere role of microorganisms. Collection of conference abstracts (Pushchino, 6–9 December, 2021) / T.A. Reshetilova (ed.). Moscow: LLC Publishing House GEOS, 2021. P. 61–63. (in Russian).
- Kapustyanchik S.Yu. Influence of miscanthus plantings on the properties of gray forest sandy soil. In book: Soils and Environment [Electronic resource]: Collection of scientific papers of the All-Russian scientific conference with international participation, dedicated to the 55th anniversary of the Institute of Soil Science and Agrochemistry SB RAS (Novosibirsk, October 2–6, 2023). Novosibirsk: ISSA SB RAS, 2023. P. 285–291. DOI: <https://doi.org/10.31251/conf1-2023>. (in Russian).
- Kapustyanchik S.Yu., Burmakina N.V., Yakimenko V.N. Evaluation of the ecological and agrochemical state of agrocenosis with long-term growing of Miscanthus in Western Siberia. *Agrokhimia*. 2020. No. 9. P. 65–73. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002188120090082>. (in Russian).
- Kapustyanchik S.Yu., Yakimenko V.N. Miscanthus is promising raw material, energy and phytomeliorative crop. *The Journal of Soils and Environment*. 2020. Vol. 3. No. 3. e126. DOI: <https://doi.org/10.31251/pos.v3i3.126>. (in Russian).
- Kovda V.A. Fundamentals of the study of soils. Moscow: Nauka Publ., 1973. Book. 2. 468 p. (in Russian).
- Sakovich G.V., Mikhailov Yu.M., Budaeva V.V., Korchagina A.A., Gismatulina Yu.A., Kozyrev N.V. Cellulose Nitrates from Unconventional Feedstocks. *Doklady Chemistry*. 2018. Vol. 483. No. 1. P. 287–291. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0012500818110101>.
- Samofalova I.A., Lobanova E.S. Soil science: laboratory workshop. Perm: IPC “Prokrost”, 2021. 139 p. (in Russian).
- Suyundukov Ya.T., Khasanova R.F. Agroecological analysis of the structural state and optimization of the properties of chernozems in the Trans-Ural region during phytomelioration / B.M. Mirkina (ed.). Ufa: Gilem, Bashk. encycl., 2016. 240 p. (in Russian).
- Syso A.I., Smolentsev B.A., Yakimenko V.N. The soil cover of Novosibirsk Akademgorodok and its eco-agricultural assessment. *Contemporary Problems of Ecology*. 2010. Vol. 3. No. 3. P. 253–264. DOI: <https://doi.org/10.1134/S199542551003001X>.
- Titlyanova A.A., Bazilevich N.I., Shmakova E.I., Snytko V.A., Dubynina S.S., Magomedova L.N., Nefedyeva L.G., Semenyuk N.V., Tishkov A.A., Ti Tran, Khakimzyanova F.I., Shatokhina N.G., Kyrgys Ch.O., Sambuu A.D. Biological productivity of grasslands. Geographical regularities and ecological features. 2nd edition, corrected and amended. Novosibirsk: ISSA SB RAS, 2018, 110 p. (in Russian).
- Kholodov V.A., Yaroslavtseva N.V., Farkhodov Y.R., Belobrov V.P., Yudin S.A., Frid A.S., Aydiev A.Y., Lazarev V.I. Changes in the ratio of aggregate fractions in humus horizons of chernozems in response to the type of their use. *Eurasian Soil Science*. 2019. Vol. 52. No. 2. P. 162–170. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229319020066>.
- Yakimenko V.N., Kapustyanchik S.Yu., Galitsyn G.Yu. Cultivation of miscanthus in continental regions of Russia. *Zemledelie*. 2021. No. 2. P. 27–31. DOI: <https://doi.org/10.24411/0044-3913-2021-10206>. (in Russian).
- Bilandžija D., Bilandžija N., Zgorelec Ž. Sequestration potential of energy crop *Miscanthus x giganteus* cultivated in continental part of Croatia. *Journal of Central European Agriculture*. 2021. Vol. 22. No. 1. P. 188–200. DOI: <https://doi.org/10.5513/JCEA01/22.1.2776>.
- Bilandžija D., Stuparić R., Galić M., Zgorelec Ž., Letoand J., Bilandžija N. Carbon Balance of *Miscanthus* Biomass from Rhizomes and Seedlings. *Agronomy*. 2022. Vol. 12. Iss. 6. P. 1426. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy12061426>.
- Carvalho J.L.N., Hudiburg T., Franco H.C.J., DeLucia E.H. Contribution of above- and belowground bioenergy crop residues to soil carbon. *Global Change Biology Bioenergy*. 2017. Vol. 9. Iss. 8. P. 1333–1343. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcbb.12411>.
- Chen Y., Tian W., Shao Y., Li Y.-J., Lin L.-A., Zhang Y.-J., Han H., Chen, Z.-J. *Miscanthus* cultivation shapes rhizosphere microbial community structure and function as assessed by Illumina MiSeq sequencing combined with PICRUSt and FUNGUId analyses. *Archives of Microbiology*. 2020. Vol. 202. P. 1157–1171. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00203-020-01830-1>.
- Christensen B.T., Lærke P.E., Jørgensen U., Kandel T.P., Thomsen I.K. Storage of *Miscanthus*-derived carbon in rhizomes, roots, and soil. *Canadian Journal of Soil Science*. 2016. Vol. 96. No. 4. P. 354–360. DOI: <https://doi.org/10.1139/cjss-2015-0135>.
- Dohleman F.G., Heaton E.A., Arundale R.A., Long S.P. Seasonal dynamics of above- and below-ground biomass and nitrogen partitioning in *Miscanthus x giganteus* and *Panicum virgatum* across three growing seasons. *Global Change Biology Bioenergy*. 2012. Vol. 4. Iss. 5. P. 534–544. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1757-1707.2011.01153.x>.

Gauder M., Graeff-Hönninger S., Lewandowski I., Claupein W. Long-term yield and performance of 15 different *Miscanthus* genotypes in southwest Germany. *Annals of Applied Biology*. 2012. Vol. 160. Iss. 2. P. 126–136. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2011.00526.x>.

Khodier A., Hussain T., Simms N., Oakey J., Kilgallon P. Deposit formation and emissions from cofiring *Miscanthus* with Daw Mill coal: Pilot plant experiments. *Fuel*. 2012. Vol. 101. P. 53–61. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.09.029>.

Mann J.J., Barney J.N., Kyser G.B., DiTomaso J.M. Root system dynamics of *Miscanthus* × *giganteus* and *Panicum virgatum* in response to rainfed and irrigated conditions in California. *BioEnergy Research*. 2013. Vol. 6. P. 678–687. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12155-012-9287-y>.

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

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

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

Zub H., Arnoult S., Brancourt-Hulmel M. Key traits for biomass production identified in different *Miscanthus* species at two harvest dates. *Biomass Bioenergy*. 2011. Vol. 35. Iss. 1. P. 637–651. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.10.020>.

Received 14 December 2023

Accepted 03 February 2024

Published 15 February 2024

About the authors:

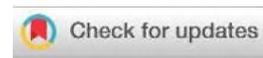
Svetlana Yu. Kapustyanchik – Doctor of Agricultural Sciences, Senior Researcher in the Sector of Introduction and Technologies of Cultivation of Agricultural Crops of the Siberian Research Institute for Plant Industry and Breeding, Branch of the Federal Research Center the Institute of Cytology and Genetics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Krasnoobsk, Russia); kapustyanchik@bionet.nsc.ru

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

The authors read and approved the final manuscript



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



Гумусовая составляющая педоседиментов конца сартанского криохрона в бассейне реки Надым (Западная Сибирь)

© 2024 М. И. Дергачева ¹, Н. Л. Бажина ¹, С. Н. Седов ^{2,3}, В. С. Шейнкман ²

¹ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, проспект Академика Лаврентьева, 8/2, г. Новосибирск, 630090, Россия. E-mail: mid555@issa-siberia.ru

²ФГБУН Институт криосферы Земли, ФГБУН ФИЦ Тюменский научный центр СО РАН, ул. Малыгина, 86, г. Тюмень, 625026, Россия. E-mail: vlad.sheinkman@mail.ru

³Институт геологии Национального автономного университета Мексики, Университетский городок, Дель Койоакан, г. Мехико, С.Р.04510, Мексика. E-mail: serg_sedov@yahoo.com

Цель исследования. Оценить индикационные возможности гумусовых веществ педоседиментов из псевдоморфоз по полигонально-жильным льдам для выявления палеоэкологических условий их формирования в период функционирования в составе почв на дневной поверхности на примере объекта Раздув конца сартанского криохрона (аналога MIS-2) в бассейне реки Надым (Западная Сибирь).

Важное замечание. В настоящей работе термины «гумус», «гумусовая составляющая почв» и «система гумусовых веществ» используются как синонимы.

Место и время проведения. Надымский район ЯНАО, урочище Раздув, 15 км к северо-востоку от г. Надым; позднелетний период, 2018 г.

Методы. Использован новый подход к диагностике биоклиматических условий конца сартанского криохрона одной из северных территорий Западной Сибири, основанный на содержащихся в педоседиментах гумусовых веществах, которые выполняют роль индикаторов палеоприродной среды.

Основные результаты. Установлено, что примененные индикаторные признаки условий формирования исследованных педоседиментов, основанные на показателях состава и спектральных свойств их гумусовой составляющей, хорошо коррелируют между собой и в своей совокупности отражают холодные гумидные условия формирования, аналогичные таковым для современных почв разных подзон тундры Западной Сибири.

Заключение. Исследование, посвященное обсуждению специфичности состава, строения и свойств гумусовых веществ педоседиментов из псевдоморфоз по полигонально-жильным льдам конца сартанского криохрона на примере ключевого участка Раздув и выявлению признаков, несущих информацию об условиях их формирования, показало, что получаемые независимыми методами и подобранные для этой цели показатели индикаторных свойств системы гумусовых веществ и одного из ее компонентов – гуминовых кислот, при решении вопросов, связанных с диагностикой биоклиматической или палеоэкологической обстановки их образования, имеют высокую значимость. В качестве современной сравнительной (рецентной) базы для диагностики и реконструкции биоклиматических условий формирования палеопочв, находящихся на дневной поверхности в период, соответствующий MIS-2, использованы характеристики современных и палеопочв северных территорий Сибири: от зауральских северных территорий до приморских низменностей Севера Якутии. Выявлено, что отобранные для исследования образцы, отнесенные по морфологическим признакам к продуктам переотложенных палеопочв – педоседиментам, действительно прошли стадию педогенного преобразования, о чем свидетельствует наличие в них гумусовых веществ, в том числе и гуминовых кислот, типичный для последних абрис ИК-Фурье спектра с характерным набором полос поглощения, индивидуальным соотношением основных структурообразующих элементов и близкими пределами количественных параметров флуоресценции испускания. Наиболее близкую сходимость состава и соотношения основных компонентов системы гумусовых веществ имеют образцы из педоседиментов конца сартанского криохрона и современных почв, сформировавшихся в условиях лесотундры Западно-Сибирского региона, для которых выявлена близость параметров соотношения основных компонентов системы гумусовых веществ, соотношения основных структурообразующих элементов, пределы величин всех флуоресцентных характеристик гуминовых кислот, особенно для образцов с повышенным содержанием гумусовых веществ и тех, которые испытывают влияние многолетнемерзлых пород. Это свидетельствует том, что в конце сартанского периода почвообразование было аналогичным таковому, имеющему место в более северных районах, чем район местонахождения урочища Раздув.

Ключевые слова: система гумусовых веществ; гуминовые кислоты; педоседименты из псевдоморфоз; диагностика; биоклиматические условия; конец сартанского криохрона; Западная Сибирь.

Цитирование: Дергачева М.И., Бажина Н.Л., Седов С.Н., Шейнкман В.С. Гумусовая составляющая педоседиментов конца сартанского криохрона в бассейне реки Надым (Западная Сибирь) // Почвы и окружающая среда. 2024. Том 7. № 1. e263. DOI: [10.31251/pos.v7i1.263](https://doi.org/10.31251/pos.v7i1.263)

ВВЕДЕНИЕ

Система гумусовых веществ (СГВ) занимает одно из ведущих положений в диагностике состояния современной природной среды и палеоэкологических обстановок прошлого. С одной стороны, она является сенсорной составляющей почв, реагирует на изменения внешней среды, отражая ее в особенностях состава, строения и свойств компонентов системы, с другой – обладает рефлекторностью, т.е. способностью записывать (и кодировать), а также сохранять в своих свойствах информацию о природных условиях своего формирования (Дергачева, 1989; 2018; 2021).

Среди компонентов системы гумусовых веществ почв наиболее специфичными, а также наиболее рефлекторными по отношению к природной среде оказались **гуминовые кислоты (ГК)**, которые в своем составе, структуре и свойствах несут информацию не только о состоянии самой гумусовой системы, но также почв и условий их формирования. К настоящему времени выявлены количественные параметры состава, структуры и свойств гуминовых кислот современных почв, формирующихся в них как ответ на долговременные воздействия природных факторов, с целью использования их для диагностики условий формирования палеопочв разного геологического возраста и реконструкции палеобиоклиматических характеристик окружающей их среды (Дергачева, 2018).

Использование набора признаков состава, строения и свойств гумусовых веществ уже вошло в практику диагностики почв и палеопочв, а также реконструкции условий их формирования. Наиболее часто они применяются при характеристиках палеоприродной среды теплых периодов (аналогов отложений нечетных стадий MIS) палеогеографической истории разномасштабных территорий (Трофимов и др., 2004; Якименко и др., 2007; Золотарева и др., 2009а, 2009б; Седов и др., 2010; Зыкина, Зыкин, 2012; Makeev, 2012; Золотарева, Демкин, 2013; Курбанова, 2021; Коркина и др., 2022; Watanabe et al., 1996; 1998; Makeev, 2009; Aseyeva et al., 2019; Rusakov et al., 2019; Makeev et al., 2021; и др.), причем, в основном, на качественном или полуколичественном уровнях.

Что касается холодных периодов палеогеографической истории (аналогов четных стадий MIS), то они диагностируются на основе тех же подходов с использованием гуминовых кислот и их соотношения с другими компонентами системы гумусовых веществ крайне редко, специальные работы этого направления малочисленны (Дергачева, 2018; Dergacheva et al., 2018; Учаев и др., 2018; Lefort et al., 2018; и др.). Изучение с этих позиций гумусовых веществ педоседиментов из псевдоморфоз по полигонально-жильным льдам и оценки их индикационных возможностей ранее не проводилось.

Причина этого кроется не только в низком содержании гуминовых кислот в отложениях, формирующихся в холодных условиях, но и в отсутствии до настоящего времени достаточного количества аналитических материалов о гуминовых кислотах и других компонентах системы гумусовых веществ современных почв криолитозоны, необходимых для создания базы данных по эколого-гумусовым связям, то есть по обусловленности их состава и свойств экологическими условиями формирования. Имеющиеся в литературе материалы, характеризующие гумусовую составляющую почв, испытывающих влияние многолетнемерзлых пород, трудно поддаются обобщению, поскольку получаются с использованием разных приемов и сроков отбора образцов, выделения гумусовых веществ, а также применяемых методов и методик изучения. Без наличия сопоставимых материалов, полученных на основе единых принципов и подходов при полевых, аналитических и инструментальных исследованиях системы гумусовых веществ почв криолитозоны, невозможно иметь надежную рецентную основу для диагностики условий гумусо- и почвообразования, а также реконструкции палеоприродной среды в периоды глубоких похолоданий климата.

В то же время, разработанные ранее подходы, опыт оценки состояния природной среды по гуминовым кислотам для отложений – аналогов не только нечетных, но и четных стадий MIS, изученных при соблюдении идентичности условий всех процедур (Дергачева, 1997, 2018; Дергачева и др., 2000, 2006; Лбова и др., 2003; Dergacheva, 2003; Fedeneva, Dergacheva, 2003, 2006; Dergacheva et al., 2016а, 2016б, 2018; и др.), а также имеющаяся у коллектива авторов рабочая база данных, содержащая сведения об основных характеристиках более 10 тысяч гуминовых кислот современных почв и палеопочв разного возраста и условий формирования (как в пределах криолитозоны, так и вне ее) в совокупности с основными показателями климатической и ландшафтной обстановок, позволили

оценить индикационную значимость основных, наиболее часто употребляемых показателей состава, особенностей строения и свойств гумусовых веществ (Дергачева, 2018). Это, в свою очередь, позволило нам в рамках разработанного ранее педогумусового метода диагностики и реконструкции палеоприродной среды (Дергачева, 1997) предложить ряд дополнительных приемов, способствующих диагностике и реконструкции экологических условий формирования системы гумусовых веществ в холодные периоды палеогеографической истории (Дергачева, 2018, 2021; Учаев и др., 2018; Бажина, Дергачева, 2021; Lefort et al., 2018; Dergacheva et al., 2018) и обратиться к оценке индикационных возможностей гумусовых веществ педоседиментов из псевдоморфоз по полигонально-жильным льдам для выявления палеоэкологических условий их формирования в период функционирования в составе почв на дневной поверхности на примере объекта Раздуй конца сартанского криохрона в бассейне реки Надым (Западная Сибирь).

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Гумусовая составляющая педоседиментов конца сартанского криохрона (MIS 2) изучалась для 11 образцов, которые отобраны в 2018 году из двух разрезов: Раздуй-1 и Раздуй-2 (рис. 1 А, Б, В). Разрезы вскрыты в песчаном карьере, расположенном на левобережье р. Надым к северу от субширотного участка среднего течения р. Оби в 15 км к юго-востоку от г. Надым (65°20'48" с. ш., 72°57'25" в. д.).

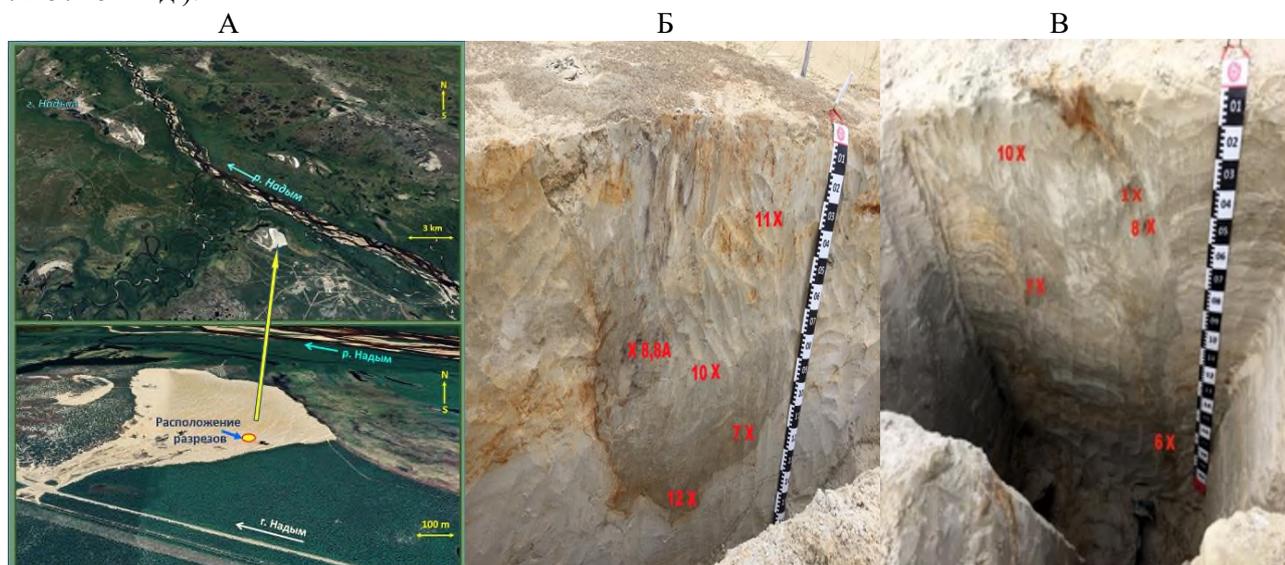


Рисунок 1. Расположение разрезов Раздуй (А) и схема отбора образцов: Б – разрез 1/18; В – разрез 2/18 (фото из архива В.С. Шейнкмана).

Расположение точек отбора образцов в разрезе, показанное на рисунке 1, позволяет представить возможные пути переотложений горизонтов палеопочв, находящихся на поверхности в конце сартанского криохрона (MIS 2), судя по имеющимся датам (Шейнкман и др., 2022). Разрезы вскрывают широкий набор палеокриогенных, педогенных и посткриогенных образований, в том числе, привлекшие наше внимание псевдоморфозы по **полигонально-жильным льдам (ПЖЛ)**, заполненные педоседиментами, позволяющими провести изучение этих образований с позиций палеопочвоведения. Как установлено ранее авторами данной статьи (Шейнкман и др., 2023; Sedov et al., 2022), подобные образования (псевдоморфозы по ПЖЛ) широко представлены в плейстоценовых палеопочвах не севере Западной Сибири, причем псевдоморфозы, заполненные педоседиментами сартанского времени – МИС-2, встречаются наиболее часто. Именно поэтому эти псевдоморфозы и были выбраны в качестве объекта данного исследования, направленного на аналитическое обсуждение возможности использования системы гумусовых веществ в диагностике педоседиментов.

Педоседименты в псевдоморфозах по полигонально-жильным льдам представляют собой переотложенный материал сильно оглеенных горизонтов с включениями гумусированных и оторфованных фрагментов. Визуально образцы различаются степенью проявления оглеенности и гумусированности (табл. 1).

Таблица 1

Объекты исследования

№ образца	Глубина, м	Визуальное описание
Разрез Раздув-1		
11	0,4	Пятнистый глей (сизый с ржавыми пятнами по порам)
8	0,7	Темно-серое гумусированное пятно
8А	0,7	Визуально образец менее гумусированный, чем предыдущий
10	0,8	Сизый, пылеватый песок, основное заполнение псевдоморфозы по клину
7	1,0	Светло-серый, плитчатый, слабогумусированный
12	1,3	Сизо-бурый, слабогумусированный
Разрез Раздув-2		
10	0,3	Пятнистый глей
1	0,3–0,5	Гумусовый клин
8	0,5	Темно-серое гумусированное пятно
7	0,8	Пятнистый глей
6	1,6	Песчаный сизый глей

Методические особенности исследования. Образцы педоседиментов исследовали с позиций разработанного одним из авторов настоящей статьи педогумусового метода диагностики природной среды и реконструкции палеобиоклиматических обстановок (Дергачева, 1997, 2018), в основе которого лежит признание гумуса почв как специфически почвенного (педогенного) образования (Дергачева, 1984, 2018, 2021), представляющего собой природную открытую самоорганизующуюся и саморегулируемую систему (Дергачева, 1989, 2018), отражающую в составе, соотношении компонентов, их структурных особенностях и свойствах природные условия своего формирования (Дергачева, 1998а, 1998б; Дергачева и др., 2000, 2006, 2012; Дергачева Рябова, 2005; Dergacheva, 2003; Fedeneva, Dergacheva, 2003, 2006; Dergacheva et al., 2016а, 2016б; и др.), и сохраняющую в пределах типовых особенностей ряд параметров состава, структуры и свойств во времени (Дергачева, 1984, 2008, 2018). На настоящий момент в наиболее полном виде метод описан в монографии: «Система гумусовых веществ как основа диагностики палеопочв и реконструкции палеоприродной среды» (Дергачева, 2018).

На основе многолетних поисков, сравнений и оценок индикационной и реперной значимости широкого круга характеристик гумусовой составляющей более десяти тысяч образцов почв и палеопочв разного возраста и условий формирования, были выделены комплексы показателей состава, структурных особенностей и свойств как гумусовых веществ в целом, так и гуминовых кислот, разные совокупности которых оказались эффективными при решении разнообразных задач теоретического почвоведения, географии и экологии почв, археологии и палеопочвоведения, а также природопользования.

С использованием обоснованных с точки зрения индикационной значимости выделенных комплексов признаков ГК уже решались вопросы диагностики условий формирования почв и палеопочв (например, см. Дергачева, 1989, 1997, 2008, 2018; Демкин и др., 1998; Дергачева и др., 1995, 2000, 2002, 2006; Лбова и др., 2000; Тихова и др., 2001; Захарова и др., 2023; Dergacheva et al., 2016а, 2016б; Lefort et al., 2018; и др.). Чаще всего они были основаны на изучении палеопочв и вмещающих их отложений разной сохранности, образцы из которых отбирались по глубине сплошной колонкой детально, каждые 2–10 см (в зависимости от решаемых задач), с учетом визуальных границ горизонтов или слоев и с более детальным анализом гумусовых и прилегающих к ним горизонтов или слоев отложений. Однако применение этого подхода для выявления особенностей палеоприродных условий по палеопедоседиментам, находящимся на разной глубине в псевдоморфозах по полигонально-жильным льдам, часто не имеющих четких морфологических признаков генетической принадлежности, проводится впервые.

Для решения задач, поставленных в настоящем исследовании, использованный комплекс характеристик гумусовой составляющей педоседиментов включал, прежде всего, содержание общего органического углерода ($C_{орг}$), определяемого по окисляемости (согласно наиболее широко применяемой методике Тюрина, 1937), а также состав и соотношение основных групп гумусовых веществ по методике Пономаревой-Плотниковой в модификации 1968 года (прописи обеих методик см. Методические указания..., 1975), на основе которых оценивалось долевое содержание основных групп гумусовых веществ (гуминовых кислот – **ГК**, фульвокислот – **ФК** и негидролизующих их форм или гуминов – **ГМ**), проводился анализ особенностей состава гуминовых кислот и рассчитывалась

величина соотношения основных групп экстрагируемых гумусовых веществ ($C_{ГК}:C_{ФК}$). Последний показатель представляет специфическую для почв разных условий формирования величину, имеющую высокую тесную связь с климатическими особенностями территории их расположения (Тюрин, 1949; Кононова, 1963; Дергачева, 1984, 2018; Орлов, 1990; Орлов и др., 1996; Дергачева, Рябова, 2005, 2006; Дергачева и др., 2005, 2015; и др.).

Кроме того, в процессе выполнения анализа состава гумуса из щелочной вытяжки после предварительного декальцирования массы образца выделялись гуминовые кислоты, которые подвергались дальнейшим аналитическим и инструментальным исследованиям. Выделение препаратов гуминовых кислот *в ходе выполнения методики изучения состава гумуса* педоседиментов обусловило повышенную стандартизацию всех используемых при получении массы препаратов приемов, не изменяющих при этом суть всех широко применяемых условий выделения гуминовых кислот, согласно Д.С. Орлову и Л.А. Гришиной (1981).

Исключением в нашем случае является отсутствие обеззоливания препаратов жесткими методами путем обработки $\text{HF}+\text{HCl}$ или 6 н. HCl , что ранее рекомендовалось Д.С. Орловым (1974), поскольку позднее было установлено, что подобная обработка выделяемых препаратов гуминовых кислот существенно изменяет основные признаки их состава и свойств (Тихова и др., 2008). Среди методических особенностей исследования, кроме отсутствия жесткой очистки ГК от минеральных компонентов с использованием 6 н. HCl и/или $\text{HF}+\text{HCl}$, необходимо подчеркнуть строгое соблюдение идентичности всех приемов выделения гуминовых кислот и их последующего анализа.

Таким образом, исследование построено на основании данных, полученных в строго стандартных условиях выделения и анализа как совокупности гумусовых веществ, так и гуминовых кислот. Определение состава гумуса по методике В.В. Пономаревой и Т.А. Плотниковой и выделение гуминовых кислот проводилось в двух повторностях, остальные аналитические и инструментальные измерения – в 2–4 повторностях (в зависимости от используемых приемов изучения). Иллюстративные материалы в настоящей статье представлены по средним данным.

Для оценки различий в степени гумификации органического вещества в педоседиментах применялось, согласно Д.С. Орлову с соавторами (1996), долевое содержание гуминовых кислот в гумусовой составляющей почв. С этой целью, кроме того, нами *были использованы показатели флуоресценции испускания щелочного экстракта гумусовых веществ (ГВ)*, выделяемых 0,1 н. NaOH после декальцирования изучаемого образца почвы или педоседимента. Сопоставление разных количественных характеристик спектров флуоресценции гумусовых веществ, находящихся в почвах или педоседиментах, позволяет оценить не только степень их гумификации, но и получить представление об уровнях алифатизации, полидисперсности и относительной сложности строения.

Из этого же *щелочного раствора* выделялись *гуминовые кислоты*, для которых были изучены элементный состав, спектральные свойства в видимой и ИК-области спектра, а также флуоресценция испускания, на основе чего давалась относительная характеристика параметров состава, структурных особенностей и свойств этого компонента системы гумусовых веществ, а также проводилось их сравнение.

Элементный состав ГК анализировался классическим методом Дюма-Прегля и дублировался на автоматических анализаторах Karla Erbe и Euro 3000 в аналитической лаборатории Института органической химии СО РАН. Электронные спектры поглощения снимались на спектрофотометре Cary-60 UV VIS. Подготовка растворов для снятия электронных спектров проводилась по методике, предложенной Д.С. Орловым и Л.А. Гришиной (1981). Расчет коэффициентов цветности (Welte, 1955) осуществлялся по оптическим плотностям при длинах волн 465 нм и 650 нм ($E_{465}:E_{650}$), коэффициентов экстинкции – согласно рекомендациям Д.С. Орлова (1990) при $\lambda = 465$ нм, толщине слоя $l = 1$ см и концентрации беззольной ГК = 0,001%.

Спектры флуоресценции гуминовых кислот снимались на сканирующем спектрофлуориметре Cary Eclipse Fluorescence Spectrophotometer («Agilent» США) в диапазоне длин волн 300–650 нм при длине волны возбуждения $\lambda = 330$ нм для растворов с одинаковой концентрацией вещества (0,01% ГК) и $\text{pH}=13$ с использованием кварцевой кюветы 1 см² через сутки после приготовления раствора. Кювета заполнялась раствором таким образом, чтобы мениск отсутствовал. Графическое оформление результатов и расчет количественных параметров спектров проводились с использованием программы Origin Graph 9.

В качестве количественных параметров для характеристики спектров флуоресценции ГК использовали положение максимума флуоресценции на шкале длин волн (λ_{max}) и величину первого

момента M_1 («центр тяжести спектра» или средневзвешенное значение частоты контура флуоресценции), которая рассчитывалась по формуле (Паркер, 1972, с.77):

$$M_1 = \sum I_i \lambda_i / \sum I_i$$

где I_i – интенсивность в контуре флуоресценции на длине волны λ_i .

Также рассчитывался коэффициент α – соотношение интегральных интенсивностей при длинах волн в областях расположения максимумов проявления флуоресценции испускания ГК в длинноволновой и коротковолновой частях спектра (Лаврик, 2003).

Введенный нами коэффициент дисперсности гуминовых кислот (Kd), рассчитываемый по разности средневзвешенной величины длин волн спектра (M_1) и длины волны максимальной флуоресценции испускания гумусовых веществ и/или гуминовых кислот (λ_{\max}), применялся для выявления количественных различий в полидисперсности образцов.

Использованный нами метод флуоресценции испускания, как всей совокупности гумусовых веществ, так и гуминовых кислот, позволяет получать *экспрессную информацию* и проводить сравнения по относительной сложности их строения (в том числе, степени сопряжения их структуры), отнесение к алифатическому или ароматическому типу структур, а также степени полидисперсности, которые соответственно отражаются в положении полосы максимума флуоресценции (λ_{\max}), величине средневзвешенной частоты контура ее спектра (M_1), а также в коэффициентах α и Kd.

ИК-спектры гуминовых кислот записывались на Фурье-спектрометре Инфралюм ФТ-801 в таблетках при соотношении ГК:KBr – 1:5 в интервале значений частот от 4000 до 500 см^{-1} . Расшифровка спектров проводилась с использованием программы Zair 3,5. При расшифровке и интерпретации спектров использовались работы (Беллами, 1963, 1971; Эллиот, 1972; Орлов, 1990; Швец, 1994; Преч и др., 2006; Васильев и др., 2007; Тарасевич, 2012; и др.). Коэффициент β , введенный нами в характеристики гуминовых кислот для оценки относительной сложности их компоновки, рассчитывался, используя прием, предложенный Н.В. Юдиной и В.Д. Тиховой (2003). Он представляет собой соотношение суммарных величин оптических плотностей наиболее типичных для гуминовых кислот характеристических полос поглощения, соответствующих алифатической (2920 см^{-1} , 2860 см^{-1}) и ароматической (1730 см^{-1} , 1610 и 1500 см^{-1}) их частям.

Графическое оформление результатов исследования проводили с помощью компьютерной программы Origin Graph 9.

При интерпретации материалов исследования гумусовой составляющей почв использовались положения педогумусового метода диагностики и реконструкции палеоприродной среды (Дергачева, 2018).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Содержание общего органического углерода в педоседиментах и долевое его распределение по разным группам и фракциям гумусовых веществ (состав гумуса). Как показывают данные (рис. 2, А, Б, а), наиболее высокие величины содержания общего органического углерода ($C_{\text{орг}}$) выявлены в образцах, визуально отличающихся повышенной гумусированностью (образец 8 из разреза 1/18 на глубине 0,7 м и образец 1 из «гумусового клина» разреза 2/18 на глубине 0,3–0,5 м). В остальных случаях они лежат в пределах 0,07–0,08%, кроме образца с минимальным содержанием органического углерода с глубины 1,6 м (разрез 2/18).

Доля углерода гуминовых кислот (ГК) всех фракций ($\Sigma C_{\text{гк}}$) составляет от 13 до 17%, за исключением образца 1 из «гумусового клина» (22–26%) и 8 – из обоих разрезов (19–20%). Средние величины содержания этого компонента в образцах педоседиментов из разрезов в 1/18 и 2/18 составляют, соответственно, 16 ± 2 и 18 ± 3 . С изменением глубины расположения педоседиментов доля ГК снижается примерно на 3%, что наиболее четко проявляется в ряду образцов зачистки 1/18. Образцы под номером 8 обоих разрезов содержат количество углерода ГК, превышающее общий фон на 3–4% (рис.2, А, Б, б).

Доля углерода фульвокислот (ФК) всех фракций ($\Sigma C_{\text{фк}}$) при этом (рис. 2, А, Б, б) с глубиной возрастает более существенно (на 6–20%), что соответственно сказывается на величине отношения $C_{\text{гк}}:C_{\text{фк}}$ в педоседиментах, расположенных на разных глубинах (рис. 2, А, Б, в). Величина этого показателя лежит в среднем в пределах 0,60–0,27 в разрезе 1/18 и 0,66–0,31 – в разрезе 2/18.

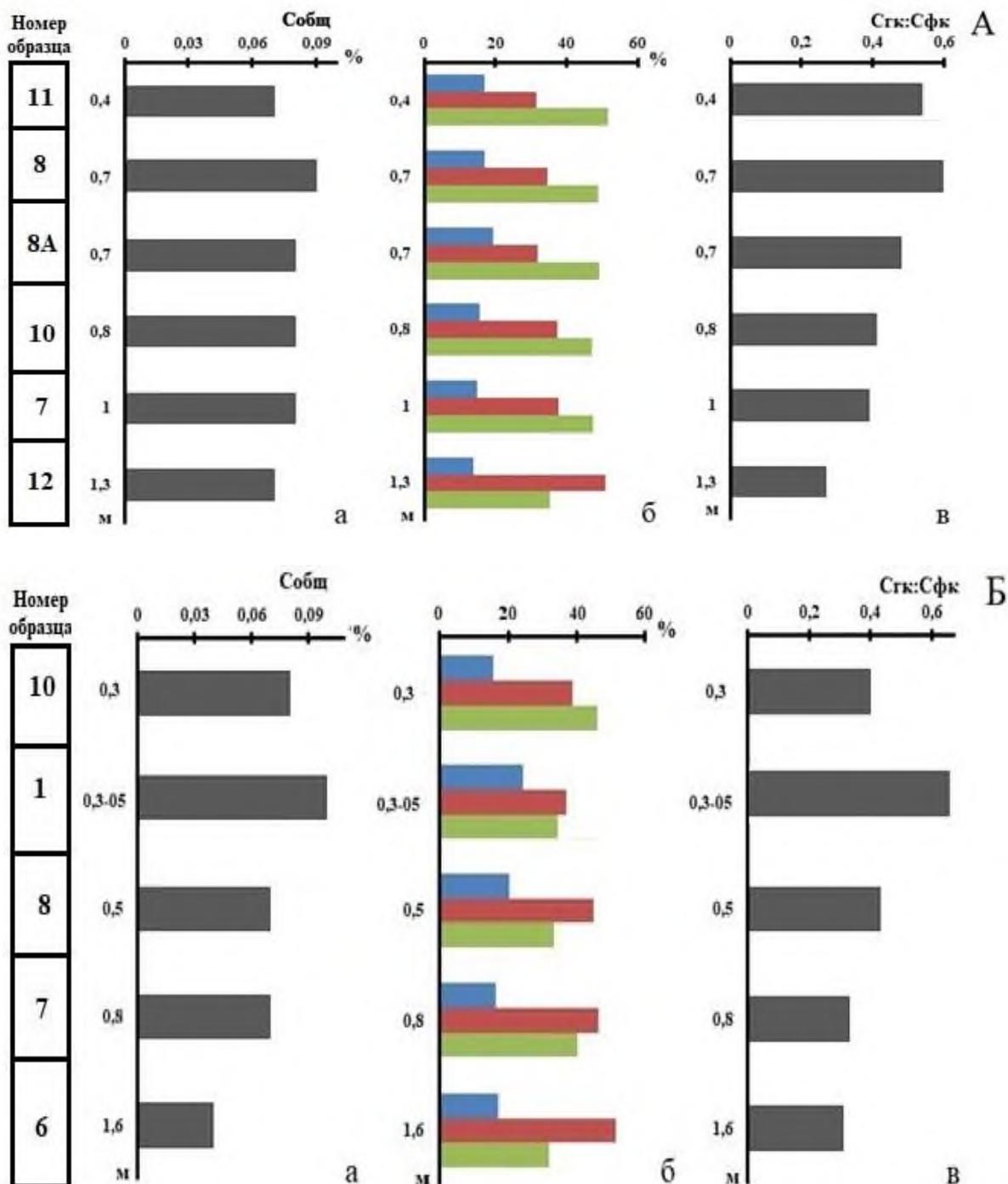


Рисунок 2. Характеристика гумусовой составляющей педоседиментов разрезов Раздув. Обозначения: А – Разрез 1/18, Б – Разрез 2/18; а – $S_{орг}$ (%), б – групповой состав гумуса (■ – гуминовые кислоты (ГК), ■ – фульвокислоты (ФК), ■ – гумины), в – $S_{гк}:S_{фк}$.

Только в образцах под номером 8 из разреза 1/18 и 1 из разреза 2/18 величина этого отношения, превышает 0,5 и тип гумуса может быть отнесен к гуматно-фульватному, в остальных – к фульватному. Такой тип гумуса характерен для почв холодных гумидных условий формирования.

Следует обратить внимание, что среди гуминовых кислот преобладают их бурые формы (ГК фр. 1), которые составляют от 35 до 56% от общего их содержания в педоседimente, превышая долевое участие ГК фр.2 в 1,5–3,0 раза (табл. 2). Такое соотношение характерно для почв, формирующихся в холодных гумидных условиях, в которых преобладающими (типowymi) являются бурые гуминовые кислоты, выделяемые непосредственной экстракцией щелочными растворами с $pH=12-13$ без предварительного декальцирования почв и осадков.

Повышенная доля ГК фр. 3 (связанных более прочно с минеральной частью, чем остальные фракции), составляющая в среднем 37 ± 4 в образцах разреза 2/18 против 26 ± 8 – другого разреза, может свидетельствовать в пользу разного по интенсивности (или длительности) влияния мерзлоты на педоседименты (табл. 2). На повышенное содержание и преобладание в ГК их третьей фракции в почвах и горизонтах, испытывающих влияние мерзлоты, указывали ранее разные авторы (Дергачева, 1997, 2018; Владыченский, 1998; Владыченский, Гончарова, 2001; Феденева, 2004; Бажина и др., 2019; и др.).

Таблица 2

Содержание и распределение по фракциям гуминовых кислот (ГК) педоседиментов из разрезов Раздув (по средним данным)

Образец	Глубина, м	Гуминовые кислоты и их фракции			
		$\Sigma C_{ГК}$, %	ГК фр. 1	ГК фр. 2	ГК фр. 3
		от $C_{орг}$	% от $\Sigma C_{ГК}$		
Разрез 1/18					
11	0,4	17,0	50	35	15
8А	0,7	16,1	49	27	24
8	0,7	19,7	42	16	42
10	0,8	15,1	45	26	29
7	1,0	14,7	52	23	25
12	1,3	13,3	56	24	20
Разрез 2/18					
10	0,3	15,4	35	21	46
1	0,3–0,5	24,3	39	27	34
8	0,5	20,0	41	21	38
7	0,8	16,1	49	15	36
6	1,6	16,8	45	22	33

Таким образом, наличие в составе всех изученных педоседиментов определенного количества продуктов гумификации – гуминовых кислот и фульвокислот – свидетельствует, что *мы имеем дело с осадками, переработанными процессом педогенеза*. В то же время, существенное преобладание среди гумусовых веществ фульвокислот, среди гуминовых кислот бурых их форм (обозначаемых как ГК фр.1) и повышенная доля ГК фр.3 указывает, что почвы, которые обусловили характер педоседиментов, формировались в холодных гумидных условиях. Снижение величины $C_{ГК}:C_{Фк}$ с глубиной при очень близких долях в содержании гуминовых кислот, представляющих собой аккумулятивный тип гумусовых веществ, могло произойти за счет существенного возрастания в этом направлении доли фульвокислот – компонента, способного к миграции, увеличению содержания которого могло способствовать оттаивание криогенных структур. В итоге, состав гумуса во всех образцах, кроме тех, которые выделяются повышенной гумусированностью даже морфологически и где величина отношения $C_{ГК}:C_{Фк}$ превышает 0,5 (0,58–0,66), относится к фульватному типу. Полученные данные по составу гумуса не противоречат имеющимся в литературе сведениям, характеризующим современные почвы и палеопочвы относительно легкого гранулометрического состава, сформировавшиеся в холодных гумидных условиях северных районов Сибири (Дергачева, Дедков, 1977; Дергачева, 1984; Золоторева и др., 2009а, 2009б; Коркина и др., 2022; Sheinkman et al., 2016; Dergacheva et al., 2018).

О степени гумификации органического вещества педоседиментов. Судя по доле гуминовых кислот среди гумусовых веществ, степень гумификации органического вещества в образцах разных разрезов различается несущественно: в разрезе 1/18 она лежит в пределах 13–20%, разрезе 2/18 – 15–24%. Различие, согласно оценке по Стьюденту, недостоверно.

Долевое участие гуминовых кислот в образцах педоседиментов свидетельствует о слабой степени гумификации органического вещества в большинстве из них, а также о более высокой («средней» по Орлову) градации этого показателя в изученных образцах морфонов с морфологически выраженной повышенной гумусированностью (см. табл. 2).

Нами дополнительно к предложенному Д.С. Орловым с соавторами (1996) применен прием оценки степени гумификации с использованием спектральных характеристик совокупности гумусовых веществ, которые включают коэффициент цветности по Вельте ($E_4:E_6$), а также

количественные параметры спектров флуоресценции испускания: длину волны максимальной интенсивности флуоресценции – λ_{\max} , величину первого момента – M_1 , и коэффициент α . Чем выше величина последнего коэффициента, тем выше степень гумификации, поскольку она фиксирует сдвиг максимума флуоресценции в сторону длинноволновой части спектра, что связано с увеличением интенсивности флуоресценции за счет возрастания доли гуминовых кислот. Аналогичную информацию несет и коэффициент $E_4:E_6$, который показывает соотношение в рассматриваемой совокупности гумусовых веществ компонентов с разной сложностью структурной организации или, косвенно, степень гумификации органического вещества почв. Спектральные характеристики щелочных растворов гумусовых веществ приведены в табл. 3.

Таблица 3

Спектральные свойства растворов гумусовых веществ из педоседиментов разрезов Раздув

№ образца	Глубина, м	E_4/E_6	λ_{\max} , нм	M_1	Kd	α
Разрез 1/18						
11	0,4	6,9	402	430	28	0,56
8	0,7	5,6	442	451	9	0,76
8 А	0,7	6,9	415	435	20	0,62
10	0,8	6,8	403	430	27	0,56
7	1,0	6,9	400	430	30	0,54
12	1,3	6,7	403	431	28	0,54
Разрез 2/18						
10	0,3	6,8	408	434	26	0,62
1	0,3–0,5	5,6	442	456	14	0,71
8	0,5	6,7	416	436	20	0,69
7	0,8	6,6	410	434	24	0,67
6	1,6	7,0	400	427	27	0,52

Данные показывают, что коэффициент цветности ($E_4:E_6$) раствора гумусовых веществ в основной массе образцов лежит в пределах 6,6–7,0, что характерно для системы гумусовых веществ с преобладанием фульвокислот, а в случае наличия гуминовых кислот – их форм с небольшой ароматической и существенно превалирующей алифатической частью в их структуре. Такие величины коэффициентов цветности наблюдаются в почвах и осадках холодных гумидных условий. В большинстве случаев максимум флуоресценции приходится на диапазон длин волн 400–403 нм в разрезе 1/18 (с отклонением в образцах 8 и 8А) и 400–410 нм – в разрезе 2/18 (с отклонением в образцах 1 и 8). Преобладание флуоресценции испускания гумусовых веществ в низковолновой области спектра проявляется и в коэффициенте α , величина которого во всех случаях лежит в диапазоне 0,5–0,7. Это не противоречит характеристикам гумусовых веществ современных тундровых почв северных районов Сибири (Дергачева, 2018; Бажина, Дергачева, 2021; Dergacheva et al., 2018). Также выявлено, что для изученных гумусовых веществ из педоседиментов характерна высокая (обычно присущая этим компонентам современных почв холодных гумидных условий) полидисперсность выделенной совокупности гумусовых веществ, отражающаяся в коэффициенте Kd – отклонении средневзвешенной величины длин волн спектра от длины волны максимума испускания на 27–30 единиц. Как и в случае других показателей, образцы под номером 8 из обоих разрезов и 1 – из «гумусового клина» разреза 2/18, имеют существенно отличающиеся величины Kd, которые лежат в пределах 9–20 относительных единиц.

Таким образом, все спектральные параметры изученной совокупности гумусовых веществ лежат в пределах, характерных для почв и седиментов, формирование которых происходило в холодных гумидных условиях.

Дальнейшее исследование специфики гумусовой составляющей педоседиментов из разрезов Раздув было направлено на изучение гуминовых кислот, выделенных из охарактеризованных выше растворов гумусовых веществ с использованием традиционного приема осаждения их в кислой среде.

Состав и свойства гуминовых кислот (ГК) изученных педоседиментов

ИК-спектры гуминовых кислот. Выделенные из совокупности гумусовых веществ гуминовые кислоты, которые, как было указано ранее, отражают в своем составе, структурных особенностях и свойствах природные (экологические) условия своего формирования и могут служить маркером или индикатором состояния последних (Дергачева, 2018), были, прежде всего, сравнены по

характеру абриса спектров в ИК области, а также наличию (или отсутствию) в них отдельных полос поглощения.

Выделенный Д.С. Орловым (1974, 1990) основной набор полос поглощения в ИК области спектров, в абсолютном большинстве случаев присутствующий в спектрах ГК почв разных условий формирования, дал ему возможность отнести характер и набор полос поглощения в ИК спектре к одному из надежных *диагностических признаков, свидетельствующих о принадлежности выделенных из почв и отложений веществ к гуминовым кислотам*. Как правило, в этот набор входят полосы поглощения, фиксирующие сопряженные связи C=C, C=O, содержание $\text{CH}_2\text{-CH}_3$, а также карбоксильных, метоксильных, фенолгидроксильных групп, присутствие спиртов и полисахаридов.

Использование ИК-Фурье спектрофотометров позволяет оценить не только наличие характерных для гуминовых кислот полос поглощения, получать информацию о наборе отдельных атомных групп, типах связей, конкретном их расположении, но и рассчитывать количественные параметры отдельных структурных частей ГК, более точно определять их особенности, связанные с изменчивостью ГК в пространстве и во времени (Дергачева, 2018).

Результаты исследований показали, что все выделенные традиционными приемами *препараты гуминовых кислот, имеют типичный для этого класса природных веществ абрис спектра и набор основных полос поглощения*. В качестве примера приводим изображение ИК-спектров гуминовых кислот из педоседиментов разреза Раздуб 2/18 (рис. 3).

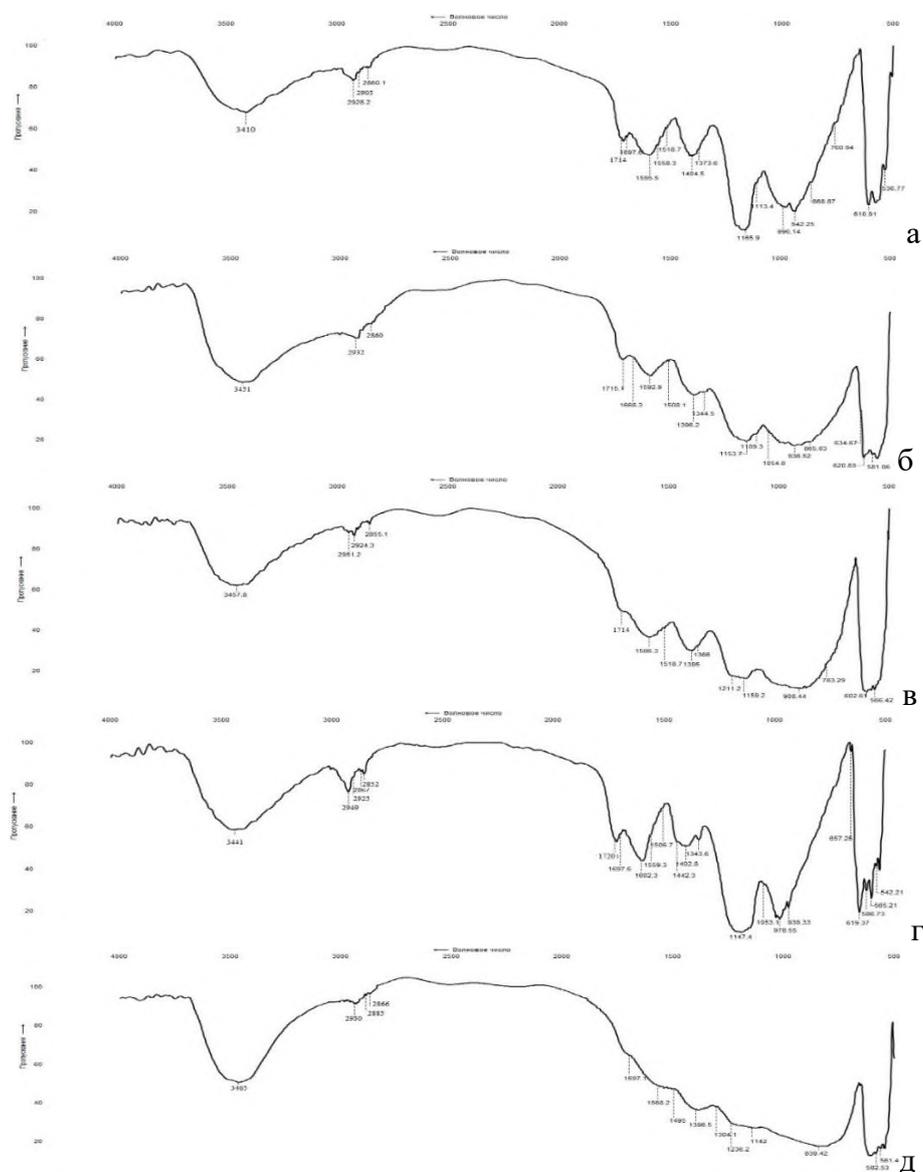


Рисунок 3. ИК-Фурье спектры гуминовых кислот педоседиментов разреза Раздуб 2/18. Образцы: а – 10 (0,3 м); б – 1 (0,3–0,5 м); в – 8 (0,5 м); г – 7 (0,8 м); д – 6 (1,3 м).

Спектры различаются интенсивностью полос поглощения и в некоторых случаях незначительными сдвигами положений их максимумов, которые, впрочем, не выходят за границы длин волн, характерных для определенных группировок.

Результаты показали, что важнейшие полосы, присущие гуминовым кислотам почв, присутствуют практически в спектрах ГК всех педоседиментов (табл. 4). Так, выделяется сильная полоса поглощения в диапазоне 3500–3300 см⁻¹, которая может быть отнесена к переменным валентным колебаниям гидроксильных групп алифатического и ароматического ряда, связанным межмолекулярными водородными связями, а также серия полос средней переменной интенсивности в области 2930–2830 см⁻¹, обусловленных валентными колебаниями метильных и метиленовых групп, участвующих в формировании алифатической периферии. В ИК-спектрах гуминовых кислот обнаруживаются полосы поглощения валентных колебаний карбонильных групп в области 1725–1700 см⁻¹, которые могут быть представлены кетонами, альдегидами, карбоновыми кислотами и их функциональными производными. Присутствующие в области 1700–1650 см⁻¹ полосы с близким расположением могут относиться к наличию в ГК групп С=О, в том числе, связанных с ароматическим ядром, а также валентных С=N (в диапазоне 1690–1630 см⁻¹). Полосы поглощения, расположенные в области 1490–1389 см⁻¹ могут быть обусловлены плоскостными деформационными колебаниями связей С–Н в СН₂ и СН₃. В областях 1180–1100 и 1080–1020 см⁻¹ в спектрах ГК изученных педоседиментов полосы фиксируют присутствие первичных и третичных спиртов, а также возможные валентные колебания гликозидных связей углеводов циклических и простых эфиров. Кроме того, в области 1080–1020 см⁻¹ отражается возможное присутствие полисахаридов, а в областях 900–860 см⁻¹ и 860–730 см⁻¹ – деформационные колебания СН ароматических фрагментов, первые из которых, согласно Д.С. Орлову (1990), оставляют слабую полосу при одном незамещенном атоме водорода, а в последнем – при двух и более. Остальные полосы в этой области спектра и при последующих уменьшающихся длинах волн принадлежат, скорее всего, присутствующим минеральным компонентам.

Таблица 4

Полосы поглощения в ИК-спектрах гуминовых кислот педоседиментов разрезов Раздуб

Разрез, № образца	Разрез 1/18						Разрез 2/18				
	11	8	8А	10	7	12	10	1	8	7	6
Полосы поглощения, см ⁻¹											
3600–3200 (ОН)	3384	3466	3437	3474	3465	3482	3410	3451	3457	3441	3465
2930–2830 (СН ₃ , СН ₂)	2931 2897 2830	2928 2893 2857	2928 2895 2858	2977 2928 2899	2928 2859 2849	2928 2913 2857	2928 2888 2852	2932 2905 2860	2951 2924 2855	2949 2925 2852	2930 2885 2866
1720–1650 (С=О)	1716	1719 1670	1699	1706	1713	1724 1706	1714 1697	1715 1668	1714 1681	1720 1697	1714 1698
1595–1500 (С=С)	1595	1595	1594	1594	1594	1560	1595	1594	1584	1558	1539
1490–1440 (СН в СН ₃)	1445	1442	1445	1441	1487	1458	1454	1440	1442	1443	1469
1425–1345 (С–СН ₃)	1425 1383	1400 1385	1425 1383	1402 1396	1399 1337	1421 1375	1404 1373	1396 1355	1394 1365	1416 1343	1385 1346
1180–1100 (спирты)	1138	1144	1140	1145	1142	1140	1165	1153	1149	1147	1123
1080–1020 (полисахариды)	1049	1041	1039	1035	1045	1038	1042	1054	1031	1053	1028
900–860 (СН ароматические)	880	870	881				869	866		882	
990–860 (минеральные компоненты)	978 939	976 939	979 939	940 841	983 884	980 822	986 942	935 906	908 819	978 939	913 839
860–730 (СН ароматические)	775 749	781 762	775 750	796 774	794	756	798 760	800 750	782	783 752	778
650–500 (минеральные компоненты)	616 584 553	615 575 557	615 578 553	579 550 513	620 582 550	619 559 541	610 560 536	616 581 528	609 566 523	619 585 542	605 582 542

Таким образом, материалы изучения ИК-спектров гуминовых кислот педоседиментов из псевдоморфоз по полигонально-жильным льдам показали, что выделенные щелочной экстракцией вещества имеют типичный для специфических природных почвенных соединений – гумусовых веществ – абрис спектров, наличие среди полос поглощения, выделенных ранее для этого класса природных веществ Д.С. Орловым (1990) основного их набора, фиксирующего присутствие разнообразных атомных групп, а также близкие расположения максимумов их проявления.

Наибольшей близостью по набору полос поглощения обладают образцы 8 и 8А из разреза 1/18, а также 1 и 8 из разреза 2/18, имеющие в морфологическом облике повышенную гумусированность. Однако между ними есть некоторые различия, которые, впрочем, не оказывают существенного влияния на идентификацию полос поглощения и расчет коэффициента β .

Элементный состав гуминовых кислот. Материалы изучения элементного состава гуминовых кислот дают ценную информацию для выявления особенностей биоклиматической обстановки формирования почв. Особую важность имеет показатель соотношения структурообразующих элементов – водорода и углерода. Его величина, как показывают опубликованные материалы, климатогенно обусловлена и является надежным индикатором климатических условий формирования почв и палеопочв (Дергачева и др., 2012; Дергачева, 2018; и др.), поэтому для диагностики биоклиматических условий формирования палеопочв конца сартанского криохрона – источников педоседиментов из разрезов Раздуд, прежде всего, был определен показатель соотношения двух элементов – водорода и углерода. Различия в величине отношения О:С в элементном составе гуминовых кислот связаны с неоднозначными текстурными свойствами и, соответственно, степенью увлажненности (и, как следствие, аэрации) осадка. Пока глубокий анализ этой связи отсутствует, имеются только данные по почвам разного гранулометрического состава, которые показывают наличие определенных градаций в величине О/С, соответствующих легкому, среднему и тяжелому составу (Дергачева, 2018). Сравнение показателей соотношения основных структурообразующих элементов в координатах Н/С и О/С способствует выявлению особенностей структуры гуминовых кислот, а также сходства и различий в условиях их формирования.

Полученные материалы изучения элементного состава гуминовых кислот педоседиментов свидетельствуют, что величина соотношения элементов водорода и углерода (Н:С) в них лежит в относительно узком диапазоне колебаний этого показателя – 1,24–1,29, что наглядно демонстрирует рисунок 4. Величина Н:С в обоих разрезах составляет в среднем $1,27 \pm 0,02$, что характерно для горизонтов современных холодных и влажных условий формирования, например, глееземов или подзолов некоторых районов Сибири, особенно в почвах легкого гранулометрического состава.

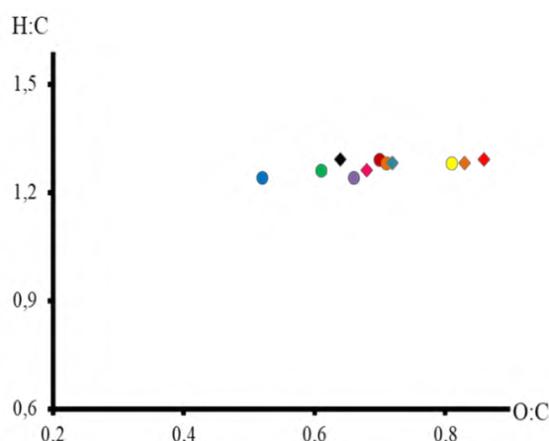


Рисунок 4. Распределение показателей элементного состава в координатах Н:С – О:С гуминовых кислот педоседиментов из разрезов Раздуд (по средним данным из 3–6 определений).

Обозначения для разреза 1/18: ● – 11 (0,4 м), ● – 8А (0,7 м), ● – 8 (0,7 м), ● – 10 (0,8 м), ● – 7 (1,0 м), ● – 12 (1,3 м); для разреза 2/18: ◆ – 1 (0,3–0,5 м), ◆ – 8 (0,5 м), ◆ – 10 (0,3 м), ◆ – 7 (0,8 м), ◆ – 6 (1,6 м).

Спектральные свойства гуминовых кислот. Спектральные свойства гуминовых кислот педоседиментов изучались в видимой и инфракрасной областях спектра, а также определялись особенности спектров флуоресценции испускания в диапазоне длин волн 300–650 нм при длине волны возбуждения $\lambda = 330$ нм.

Коэффициент экстинкции ($E_{\text{гк}}$) и коэффициент цветности ($E_4:E_6$), характеризующие параметры гуминовых кислот по спектрам в видимой области, начали применять в начале второй половины прошлого столетия (Кононова, Бельчикова, 1950). Возможность использования этих показателей при сравнительных исследованиях особенностей гумусо- и почвообразования, хорошо обоснована,

описаны методические тонкости их определения и интерпретации материалов изучения (Орлов, 1974, 1990).

Полученные нами данные показали, что абсолютные величины коэффициентов цветности ($E_4:E_6$) и экстинкции ($E^{ГК}$) лежат в пределах, характерных для почв холодных гумидных условий (табл. 5). Горизонты повышенной гумусированности (8 из разреза 1/18 и 1 из разреза 2/18) имеют самые низкие абсолютные значения первого коэффициента, величина которого составляет округленно 5,3 и самые высокие из всех образцов – коэффициента экстинкции (0,039). Сопряженные с ними и/или имеющие морфологическое подобие (образцы 8А и 8 из соответствующих разрезов) существенно превышают первые и различаются между собой почти на 0,4 единицы. Что касается минеральных горизонтов, то в первом из разрезов величины коэффициентов цветности лежат в диапазоне 6,18–6,45, во втором – 6,50–6,91, коэффициентов экстинкции – в диапазоне 0,028–0,032 в разрезе 1/18 и 0,030–0,037 – в 2/18, что может свидетельствовать в пользу неоднозначных локальных условий функционирования позднесартанских палеопочв двух вскрытых разрезов Раздуд в период их распространения на поверхности территории.

Таблица 5

Основные параметры состава и спектральных свойств гуминовых кислот педоседиментов из разрезов Раздуд (по средним данным)

№ образца	Глубина, м	Н:С	$E_4:E_6$	β^*	$E^{ГК}$	λ_{max} , нм	M_1	Kd*	Кр	Исин	α^*
Разрез 1/18											
11	0,4	1,29	6,38	0,73	0,032	423	453	30	1,90	3,71	0,51
8	0,7	1,28	5,27	0,88	0,039	461	477	16	2,99	3,70	0,81
8А	0,7	1,29	6,15	0,71	0,034	436	458	22	1,83	2,76	0,66
10	0,8	1,26	6,34	0,64	0,032	422	450	28	1,82	3,36	0,54
7	1,0	1,24	6,18	0,62	0,028	416	440	24	1,78	3,25	0,55
12	1,3	1,24	6,45	Не опр.	0,030	418	443	25	2,03	3,61	0,56
Разрез 2/18											
10	0,3	1,29	6,50	0,68	0,030	423	449	26	2,08	3,72	0,56
1	0,3–0,5	1,29	5,33	0,90	0,039	459	475	16	3,51	4,33	0,81
8	0,5	1,28	6,16	0,69	0,033	433	455	22	2,57	4,11	0,62
7	0,8	1,28	6,50	0,71	0,037	427	447	20	2,24	3,45	0,63
6	1,6	1,26	6,91	0,63	0,033	420	444	24	2,24	3,74	0,60

Примечание.

* α – коэффициент соотношения максимальных интенсивностей флуоресценции испускания гуминовых кислот в длинноволновой и коротковолновой частях спектра; β – коэффициент соотношения интенсивности полос ИК-спектров, характерных для ароматической ($\Sigma C=C$ связей) и алифатической (ΣCH_3-CH_2 связей) частей гуминовых кислот (подробности см. в разделе о методах исследования). $E^{ГК}$ – коэффициент экстинкции по Д.С. Орлову (1990). Kd – коэффициент дисперсности (см. в разделе о методах).

Определенные различия выявляются между разрезами и в других характеристиках. Так, различные количественные показатели, рассчитанные по флуоресцентным спектрам испускания гуминовых кислот, позволили выявить, что образцы, представляющие морфологически выделяющиеся повышенной гумусированностью педоседименты, отличаются от остальных всеми составляющими примененного комплекса. Они в обоих разрезах имеют относительный сдвиг положения максимума флуоресценции в сторону более длинных волн, причем абсолютные величины в них очень близки (λ_{max} – 461 нм и 436 нм в разрезе 1/18, 459 нм и 433 нм – в разрезе 2/18). У остальных ГК из педоседиментов максимум флуоресценции сдвинут в коротковолновую сторону так, что они находятся в диапазоне длин волн 416–423 нм в первом случае и 420–427 нм – во втором. Положение максимальной флуоресценции испускания ГК показывает относительную сложность структурной организации этого компонента педоседиментов и может свидетельствовать о более высокой степени их ароматичности в гумусированных горизонтах по сравнению с остальными. Это подтверждается и другими рассчитанными на основе снятых спектров флуоресценции показателями, характеризующими ГК, такими, как первый момент (M_1) и коэффициент α . Последний из них, представляя собой отношение интенсивностей флуоресценции в местах максимального ее проявления в коротковолновой и длинноволновой областях спектра на уровне количественных показателей, подтверждает разную степень алифатизации ГК, которая в гумусированных горизонтах обоих разрезов не выходит за рамки 0,81–0,62, а в других образцах составляет 0,51–0,56 в первом

разрезах и 0,56–0,65 – во втором. Преобладание алифатических группировок подтверждается и сравнением ГК из педоседиментов по коэффициенту β , полученному на основе другого независимого метода – ИК-спектрометрии. Коэффициент, рассчитанный по соотношению сумм интенсивности полос поглощения в области наиболее характерных для ароматической части ГК почв группировок с C=C связями и для алифатической части с $\text{CH}_3\text{-CH}_2$ связями, показал, что все гуминовые кислоты относятся к алифатическому типу, поскольку величина этого коэффициента ниже 1,0. Различия в степени алифатизации гуминовых кислот, показанных при анализе коэффициента α , подтвердились: в горизонтах с наиболее явным присутствием гумусовых веществ и имеющих характеристики, свидетельствующие об их повышенной относительно других образцов ароматизации, коэффициент β не выходит за пределы 0,69–0,90, причем и для ГК из остальных образцов диапазон предела из изменчивости практически одинаков (0,62–0,73 в разрезе 1/18 и 0,63–0,71 – в разрезе 2/18). Различия в относительной сложности строения гуминовых кислот и в их полидисперсности подтверждают и другие показатели – первый момент и коэффициент дисперсности K_d (см. табл. 5). Они показывают, что среди всех гуминовых кислот по относительной сложности сложения можно выделить две группы: ГК из образцов 8, 8А разреза 1/18 и 1, 8 из разреза 2/18 с относительно пониженной степенью алифатизации и полидисперсности, и ГК из образцов 11, 10, 7, 12 из первого разреза и 10, 7 и 6 – из второго, где выявлена относительно повышенная доля алифатических фрагментов, а вся совокупность макромолекул гуминовых кислот имеет более высокую полидисперсность.

Несмотря на то, что абсолютные величины и пределы изменчивости показателей, характеризующих состав, сложение и свойства гуминовых кислот, выделенных из педоседиментов, в рассматриваемых разрезах различаются, достоверность этих различий, оцененная по Стьюденту, лежит в зоне неопределенности. Это позволяет рассматривать и оценивать биоклиматические условия формирования образцов из псевдоморфоз обоих разрезов в целом.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Настоящее исследование было предпринято не только для оценки возможности использования гумусовых веществ педоседиментов в качестве индикаторов состояния природной среды разных условий формирования, но и как дополнительные доказательства отсутствия покровного оледенения на севере территории Западной Сибири в сартанский период палеогеографической истории. Присутствие процесса почвообразования в конце сартанского криохрона (аналога MIS-2), которое удостоверяется приведенными выше данными, подтверждает вывод, сделанный В.С. Шейнкманым и С.Н. Седовым (Шейнкман и др., 2022; Sedov et al., 2022) о внеледниковом развитии региона в периоды криохронов. Разрезы, заложенные в урочище Раздув, где в результате добычи песка вскрылось на поверхности присутствие полигонально-жильных структур, связь которых с криогидроморфными палеопочвами, имеющими площадное распространение и зональный характер, впервые была установлена этими авторами (Sheinkman et al., 2016; Sedov et al., 2022), оказались хорошим объектом для оценки доказательных возможностей присутствия надежных признаков, фиксирующих наличие педогенного преобразования почвенной массы, находящейся на дневной поверхности в период, предшествующий концу криохрона, а также особенностей природной обстановки, в которой они формировались.

Что касается использования параметров системы гумусовых веществ и одного из наиболее специфичного ее компонента – гуминовых кислот, выделенных из педоседиментов, для выявления биоклиматических условий формирования почвы конца сартанского криохрона, нами проведено их сравнение с имеющимися результатами изучения гуминовых кислот из современных почв северных территорий Сибири: от зауральских северных территорий до приморских низменностей Севера Якутии. Было выбрано три ключевых участка с характерным набором для условий тундры и лесотундры почв, расположенных в северо-западной части Западной Сибири (участок I), на полуострове Быковского в районе Тикси (участок II) и в западной части Колымской низменности (участок III). Сравнение имеющихся в литературе данных по составу гумуса и оптическим свойствам в видимой части спектра почв северных районов Сибири (ссылки на них указаны в вводной части настоящей статьи) показало отсутствие противоречий, однако корректные и надежные сравнения можно проводить только по материалам, полученным с использованием стандартных условий, приемов, методов и методик изучения всех сравниваемых объектов. Поскольку наиболее активное влияние процесс гумусообразования оказывает на органогенные или гумусовые горизонты и сравнению подлежат гумусовые вещества педоседиментов из псевдоморфоз по полигонально-жильным льдам, в качестве сравнительного материала использовались данные, характеризующие ГВ

или ГК верхних горизонтов современных почв и образцы из этих профилей, расположенные на или внутри многолетнемерзлых пород.

Прежде всего, было проведено сравнение соотношения углерода главных групп гумусовых веществ – гуминовых кислот и фульвокислот, используя поля распределения в координатном пространстве, образуемые этими составляющими системы гумусовых веществ: $C_{ГК}$ и $C_{ФК}$.

Сначала сравнивались органогенные горизонты современных почв всех ключевых участков с результатами, полученными для педоседиментов с морфологически выраженной гумусированностью (рис. 5 А), затем были выявлены варианты с наибольшей близостью определяемых параметров (рис. 5 Б). Оказалось, что наибольшую близость педоседименты имеют к органогенным горизонтам тундровых почв, распространенных на территории тундры и лесотундры северо-западных районов Западно-Сибирской низменности.

Сравнение аналогичного показателя остальных педоседиментов с характеристиками образцов из горизонтов современных почв, находящихся под длительным влиянием многолетнемерзлых пород (рис. 6 А), показало, что они имеют сходство не только с таковыми из почв ключевого участка 1, но и с некоторыми образцами из разрезов других сравниваемых участков. Это позволяет оценивать влияние многолетнемерзлых пород на соотношение основных компонентов гумусовых веществ по образцам разной локализации.

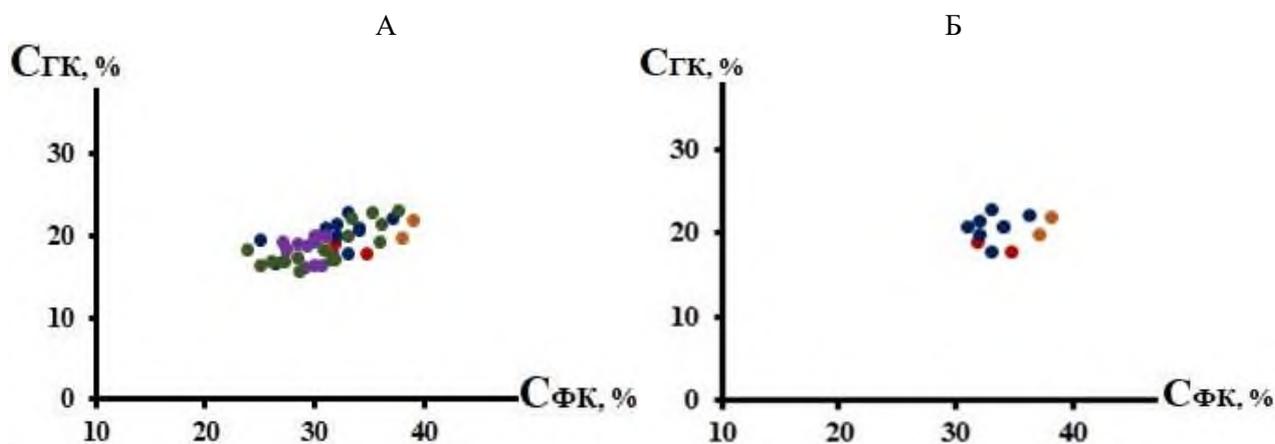


Рисунок 5. Сравнение соотношений основных компонентов системы гумусовых веществ органогенных горизонтов современных почв (ключевые участки: ● – I; ● – II; ● – III) и педоседиментов с морфологически выраженной гумусированностью разрезов Раздув: ● – разрез 1/18; ● – разрез 2/18. А – для всего массива образцов; Б – для наиболее совпадающих вариантов.

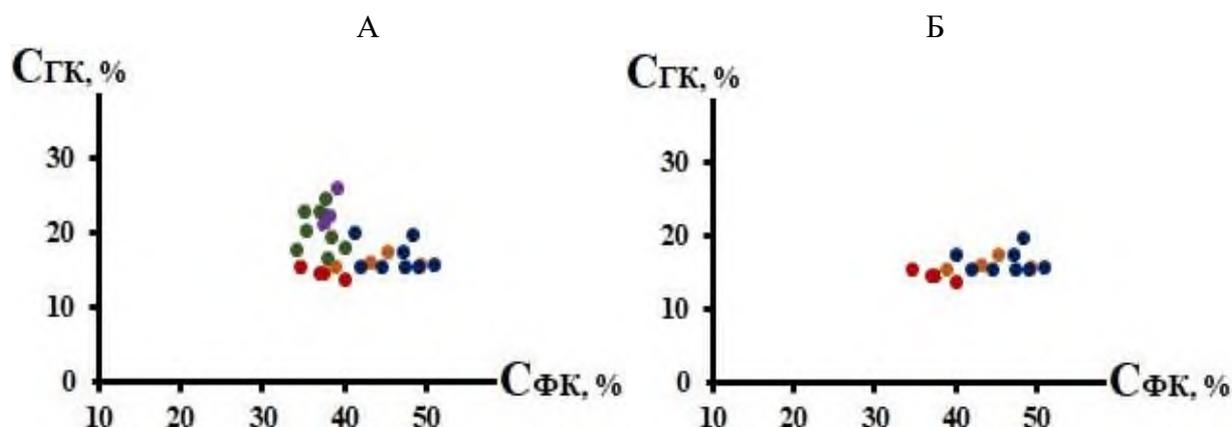


Рисунок 6. Сравнение соотношений основных компонентов системы гумусовых веществ горизонтов, расположенных на многолетнемерзлой поверхности современных почв (ключевые участки: ● – I; ● – II; ● – III) и педоседиментов разрезов Раздув: ● – разрез 1/18; ● – разрез 2/18. А – для всего массива образцов; Б – для наиболее совпадающих вариантов.

Аналогичное сравнение проведено по соотношению элементов водорода и углерода в гуминовых кислотах (рис. 7 и 8), которое показывает, что его величина в верхних горизонтах четко связана с изменением континентальности климата в направлении от почв западной части Колымской низменности к почвам северо-западной части Западной Сибири. Наибольшие совпадения просматриваются для почв последней территории и педоседиментов из псевдоморфоз по полигонально-жильным льдам урочища Раздув (рис. 7 Б).

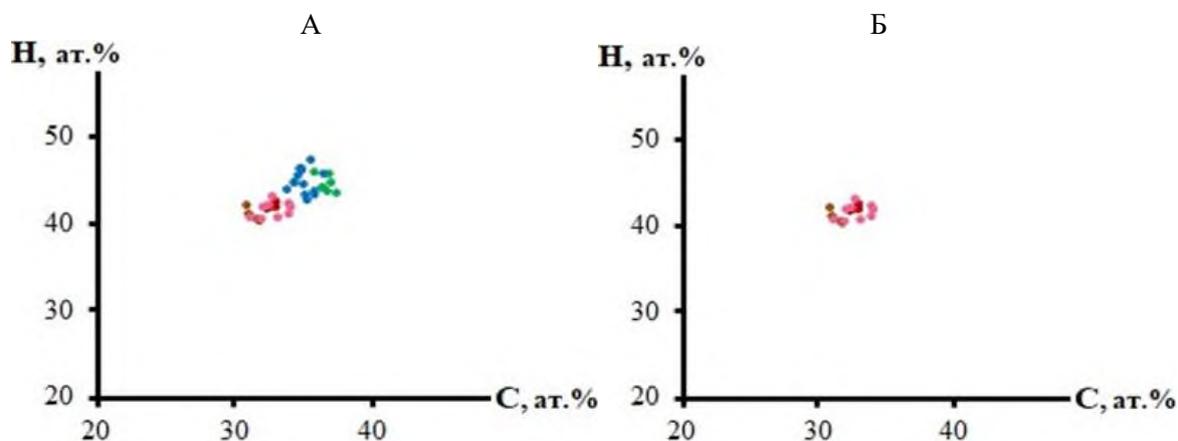


Рисунок 7. Сравнение соотношений основных элементов гуминовых кислот органических горизонтов современных почв (ключевые участки: ● – I; ● – II; ● – III) и педоседиментов с морфологически выраженной гумусированностью разрезов Раздув: ● – разрез 1/18; ● – разрез 2/18. А – для всего массива образцов; Б – для наиболее совпадающих вариантов.

Кроме того, оказалось, что аналогичная направленность изменения с востока на запад соотношения Н–С в ГК присутствует и в горизонтах с влиянием многолетнемерзлых пород современных почв (рис. 8 А), хотя большую роль при этом играют также ландшафтные условия: по этому параметру гуминовые кислоты почв арктической тундры (участок II) отличаются от таковой лесотундры и южной тундры (участки I и III). Наибольшие совпадения, как и в случае с соотношением разных групп гумусовых веществ, выявлено между показателями соотношения элементов водорода и углерода в рассматриваемых педоседиментах и современных тундровых почв северо-западной части Западной Сибири (участок I), что четко фиксируется на рис. 8Б.

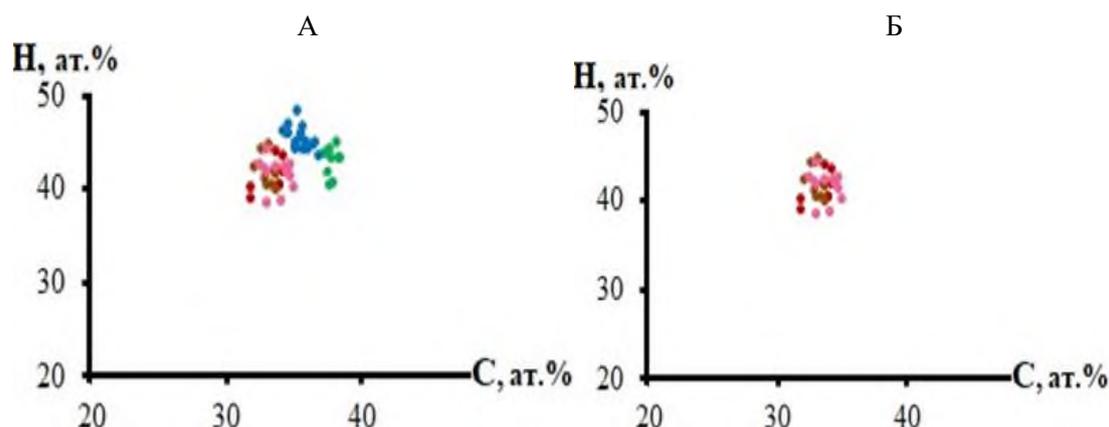


Рисунок 8. Сравнение соотношений основных элементов гуминовых кислот горизонтов, расположенных на многолетнемерзлых поверхностях современных почв (ключевые участки: ● – I; ● – II; ● – III) и педоседиментов с морфологически выраженной гумусированностью разрезов Раздув: ● – разрез 1/18; ● – разрез 2/18. А – для всего массива образцов; Б – для наиболее совпадающих вариантов.

Опираясь на имеющуюся оценку связей между разными показателями состава, структурного сложения и свойств гуминовых кислот для широкого круга регионов России в опубликованных работах (Дергачева и др., 2015; Дергачева, 2018, 2021; Бажина, Дергачева, 2021; и др.) и

показывающую тесную связь большинства используемых при диагностике и реконструкциях палеоприродной среды параметров гуминовых кислот между собой, нами рассчитаны коэффициенты корреляции климатогенно обусловленного показателя Н:С с другими характеристиками состава и свойств гуминовых кислот из педоседиментов разрезов Раздуд (табл. 6).

Вычисленные коэффициенты корреляции по материалам изучения этого объекта лежат в диапазоне 0,7–0,9 за исключением одного из показателей флуоресцентных свойств ГК (α), где $r < 0,7$.

Таблица 6

Коэффициенты корреляции между Н:С и другими показателями состава и свойств гуминовых кислот педоседиментов из разрезов Раздуд

Показатель	Коэффициент корреляции
M_1	0,88
λ_{\max} , нм	0,73
$E_4:E_6$	0,73
α	0,69
β	0,74

Поскольку приведенные в таблице 6 коэффициенты свидетельствуют об относительно тесной корреляции разных примененных нами в настоящей работе показателей состава и свойств ГК, при оценке сходства и различий изученных параметров гуминовых кислот педоседиментов и современных почв северных территорий Сибири, мы ограничимся приведенными иллюстрациями (см. рис. 5–8), которые подтверждают наибольшую близость образцов педоседиментов из разрезов Раздуд и современных тундровых почв северо-западных районов Западной Сибири.

Имеющиеся данные, показывающие тесные связи величины Н:С и других характеристик ГК почв Западной Сибири разных условий формирования с длительностью периода биологической активности, определяемой по Д.С. Орлову как число дней с температурами выше $+10\text{ }^\circ\text{C}$ и запасах продуктивной влаги в почве не менее 1% (рис. 9 А), позволили в самом первом приближении оценить число дней этого периода по одному из параметров ГК (а именно, M_1), при котором формировались педоседименты, когда находились в виде почвенных горизонтов на дневной поверхности в конце сартанского криохрона (рис. 9 Б).

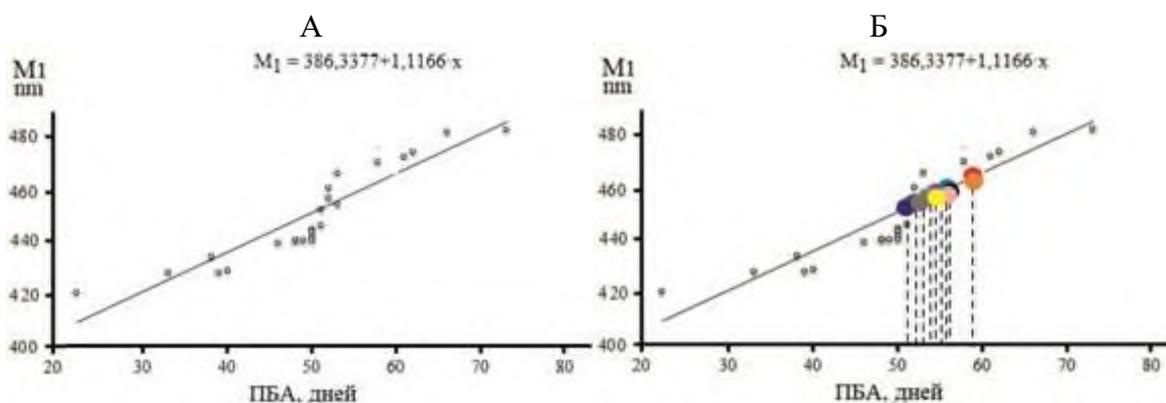


Рисунок 9. Связь первого момента M_1 (А, Б) в гуминовых кислотах почв с периодом биологической активности для современных почв лесотундры и южной тундры Западной Сибири (А); для педоседиментов из разрезов Раздуда (Б).

Обозначения образцов из разреза 1/18: ● – 11 (0,4 м), ● – 8 (0,7 м), ● – 8А (0,7 м), ● – 10 (0,8 м), ● – 7 (1 м), ● – 12 (1,3 м); из разреза 2/18: ● – 10 (0,3 м), ● – 1 (0,3–0,5 м), ● – 8 (0,5 м), ● – 7 (0,8 м), ● – 6 (1,6 м).

Как показывает анализ данных (см. рис. 9), ПБА в период формирования почв, соответствующих педоседиментам с повышенной гумусностью, мог составлять около 60 дней, остальные – меньше. Результаты должны оцениваться как предварительные. Для их уточнения необходимы дополнительные материалы, характеризующие более широкий набор почв разных экологических (локальных) условий формирования, а также накопление новых данных и

экспериментальное определение длительного влияния многолетней мерзлоты на поведение гумусовых веществ почвенных образцов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ всех полученных материалов показал, что характеристики гумусовой составляющей педоседиментов представляют собой две категории величин, одни из которых присущи педоседиментам из гумусированных (возможно органогенных в прошлом?) горизонтов, другие – из минеральных. В первых состав гумуса отличается гуматно-фульватным типом, пограничным положением степени гумификации между низкой и средней, более низкой степенью полидисперсности как всей совокупности гумусовых веществ, так и отделенных от них гуминовых кислот, положением максимума флуоресценции испускания последних в области длин волн, лежащих после 430 нм, более высокими относительно остальных образцов абсолютными величинами коэффициентов α , β и значениями первого момента M_1 , показывающими повышенное содержание в ГК сопряженных связей или более высокую их ароматичность. В остальных образцах выявлен фульватный состав гумуса, низкая степень гумификации органического вещества, повышенная степень дисперсности гумусовых веществ как в целом, так и гуминовых кислот, положение максимума флуоресценции испускания ГК в низковолновой синей части спектра с длинами волн ниже 427 нм, пониженными относительно предыдущих абсолютными величинами основных коэффициентов α , β , а также M_1 , показывающими более высокую степень их алифатизации.

В целом, основные параметры состава, структурных особенностей и свойств гумусовой составляющей изученных педоседиментов лежат в пределах, характерных для современных тундровых почв, распространенных в условиях лесотундры и тундры Западно-Сибирского региона. Период биологической активности в этих почвах в первом приближении составляет около 50 дней. Для уточнения длительности ПБА требуется получение и привлечение дополнительных материалов, характеризующих расширенный круг почв данного региона и установление связей между параметрами состава и свойств ГК и соответствующими климатическими показателями.

Некоторые незначительные различия в количественных величинах, характеризующих гуминовые кислоты педоседиментов из разных разрезов, могут быть обусловлены неоднозначностью локальных условий формирования палеопочв, находящихся в период их положения на дневной поверхности или некоторыми различиями в условиях и длительности их сохранности в мерзлоте.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ по государственному заданию ИПА СО РАН (проект № 121031700309-1) и ИКЗ ТюмНЦ СО РАН (тема № FWRZ-2021-0005).

ЛИТЕРАТУРА

- Бажина Н.Л., Дергачева М.И. Флуоресцентные свойства гуминовых кислот почв разных условий формирования // Почвы и окружающая среда. 2021. Том 4. № 4. e167. DOI. <https://doi.org/10.31251/pos.v4i4.167>.
- Бажина Н.Л., Учаев А.П., Некрасова О.А., Валдайских В.В. Состав гумуса почв подошвы Восточного склона Полярного Урала (Лабытнанги) // Палеопочвы – хранители информации о природной среде прошлого. Материалы X Международной научной молодежной школы по палеопочвоведению (Новосибирск, 1–6 августа 2019 г.). Новосибирск: Новосибирский издательский дом, 2019. С. 9–14.
- Беллами Л. Инфракрасные спектры сложных молекул. Москва: Изд-во иностранной литературы, 1963. 590 с.
- Беллами Л. Новые данные по ИК-спектрам сложных молекул. Москва: Мир, 1971. 319 с.
- Васильев А.В., Гриненко Е.В., Щукин А.О., Федулina Т.Г. Инфракрасная спектроскопия органических и природных соединений: Учебное пособие. Санкт-Петербург: СПбГЛТА, 2007. 54 с.
- Владыченский А.С. Особенности горного почвообразования. Москва: Наука, 1998. 191 с.
- Гончарова О.Ю., Владыченский А.С. Особенности гумусного состояния криоаридных почв Юго-Восточного Алтая // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. 2001. Том 17. № 4. С. 13–18.
- Демкин В.А., Дергачева М.И., Борисов А.В., Рысков С.А., Олейник С.А. Эволюция почв и изменение климата восточно-европейской полупустыни в позднем голоцене // Почвоведение. 1998. № 2. С. 148–157.
- Дергачева М.И. Органическое вещество почв: статика и динамика. Новосибирск: Наука, 1984. 153 с.

- Дергачева М.И. Система гумусовых веществ почв: пространственные и временные аспекты. Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1989. 108 с.
- Дергачева М.И. Археологическое почвоведение. Новосибирск: Изд-во СО РАН науч.-изд. центр ОИГТМ, 1997. 227 с.
- Дергачева М.И. Педогумусовый метод реконструкции палеоклиматов // Проблемы реконструкции климата и природной среды голоцена и плейстоцена Сибири. 1998а. С. 132–142.
- Дергачева М.И. Реконструкция условий почвообразования педогумусовым методом // Экология и почвы: избранные лекции 1–7 Всероссийской школы (1991–1997 гг.). Пушкино: Отдел научно-технической информации Пушкинского научного центра РАН, 1998б. Том 1. С. 263–283.
- Дергачева М.И. Гумусовая память почв // Память почв: почва как память биосферно-геосферно-антропоферных взаимодействий. Москва: Изд-во URSS, 2008. С. 530–560.
- Дергачева М.И. Система гумусовых веществ как основа диагностики палеопочв и реконструкции палеоприродной среды. Новосибирск: Изд-во Сибирского отделения РАН, 2018. 291 с.
- Дергачева М.И. Традиции и новаторство в Учении о гумусе почв // Почвы и окружающая среда. 2021. Том 4. № 4. e172. DOI: <https://doi.org/10.31251/pos.v4i4.172>.
- Дергачева М.И., Бажина Н.Л., Ондар Е.Э., Очур К.О., Рябова Н.Н. Экологическая обусловленность состава и свойств гуминовых кислот почв западной части Тувы // Вестник Оренбургского государственного университета. 2015. № 10 (185). С. 166–169.
- Дергачева М.И., Вашукевич Н.В., Гранина Н.И. Гумус и голоцен-плиоценовое почвообразование в Предбайкалье. Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2000. 206 с.
- Дергачева М.И., Гончарова Н.В., Феденева И.Н. Гумус современных почв Горного Алтая как основа диагностики природной среды и климатов прошлого. Основные закономерности глобальных и региональных изменений климата и природной среды в позднем кайнозое Сибири. Новосибирск: Изд-во Ин-та археологии и этнографии СО РАН, 2002. Вып. 1. С. 122–133.
- Дергачева М.И., Дедков В.С. Влияние промерзания-оттаивания на органическое вещество почв Приобской лесотундры // Экология. 1977. № 2. С. 23–32.
- Дергачева М.И., Деревянко А.П., Феденева И.Н. Эволюция природной среды Горного Алтая в позднем плейстоцене и голоцене: (реконструкция по признакам педогенеза). Новосибирск: Изд-во Ин-та археологии и этнографии, 2006. 143 с.
- Дергачева М.И., Лаухин С.А., Феденева И.Н. Палеогеографические реконструкции Чулымо-Енисейской впадины по ископаемым почвам на примере Куртаковского археологического района. В книге: Методы естественных наук в археологических реконструкциях. Новосибирск: Изд-во Ин-та археологии и этнографии СО РАН, 1995. Ч. 1. С. 106–115.
- Дергачева М.И., Некрасова О.А., Оконешникова М.В., Васильева Д.И., Гаврилов Д.А., Очур К.О., Ондар Е.Э. Соотношение элементов в гуминовых кислотах как источник информации о природной среде формирования почв // Сибирский экологический журнал. 2012. Том 19. № 5. С. 667–676.
- Дергачева М.И., Рябова Н.Н. Коррелятивные связи состава гумуса и климатических показателей в условиях горных территорий юга Сибири // Вестник Томского государственного университета. 2005. № 15. С. 68–71.
- Дергачева М.И., Рябова Н.Н. Эколого-гумусовые связи горных стран и возможности использования их при реконструкции палеоприродной среды // Почва как связующее звено функционирования природных и антропогенно-преобразованных экосистем: материалы II Международной конференции. Иркутск: Изд-во Иркутского государственного университета, 2006. С. 37–42.
- Дергачева М.И., Рябова Н.Н., Ондар Е.Э. Эколого-гумусовые связи в условиях Тувы как основа реконструкции палеоприродной среды // Природные условия, история и культура Западной Монголии и сопредельных регионов: материалы VII Международной конференции (Кызыл, 19–23 сентября 2005 г.). Кызыл: Изд-во Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН, 2005. Том 1. С. 134–137.
- Захарова Е.Г., Дергачева М.И., Каллас Е.В., Бажина Н.Л. Специфика гумусовых профилей чернозёмов левобережья реки Оби в пределах Приобского плато // Почвы и окружающая среда. 2023. Том 6. № 2. e214. DOI: <https://doi.org/10.31251/pos.v6i2.214>.
- Золотарева Б.Н., Демкин В.А. Гумус палеопочв археологических памятников сухих степей Волго-Донского междуречья // Почвоведение. 2013. № 3. С. 291–302.

- Золотарева Б.Н., Фоминых Л.А., Холодов А.Л., Ширшова Л.Т. Состав гумуса разновозрастных погребенных почв тундровой зоны // Почвоведение. 2009а. № 5. С. 540–550.
- Золотарева Б.Н., Фоминых Л.А., Ширшова Л.Т., Холодов А.Л. Состав гумуса мерзлотных почв Большеземельской и Колымской тундр // Почвоведение. 2009б. № 1. С. 42–55.
- Зыкина В.С., Зыкин В.С. Лёссово-почвенная последовательность и эволюция природной среды и климата Западной Сибири в плейстоцене. Новосибирск: Гео, 2012. 477 с.
- Кононова М.М. Органическое вещество почвы. Москва: Изд-во АН СССР, 1963. 315 с.
- Кононова М.М., Бельчикова Н.П. Опыт характеристики природы почвенных гуминовых кислот с помощью спектроскопии // Доклады Академии наук СССР. 1950. Том 72. № 1. С. 125.
- Коркина Е.А., Русаков А.В., Головлева Ю.А. Динамика биогеохимического цикла углерода в плейстоцен-голоценовый период // Изменения климата и углеродная нейтральность: вызовы и возможности. Сборник материалов всероссийской научно-практической конференции (Ханты-Мансийск, 10 июня 2022 г.). Ханты-Мансийск: Общество с ограниченной ответственностью "Печатный мир г. Ханты-Мансийск", 2022. С. 23–28.
- Курбанова Ф.Г. Почвы археологических памятников как индикаторы динамики природной среды центра Русской равнины во второй половине голоцена. Автореферат диссертации ... канд. биол. наук. Москва, 2021. 26 с.
- Лаврик Н.Л. Изучение полидисперсных свойств молекул гуминовых кислот с помощью люминесцентной спектроскопии // Химия в интересах устойчивого развития. 2003. Том 11. № 5. С. 751–755.
- Лбова Л.В., Резанов И.Н., Калмыков Н.П., Коломиец В.Л., Дергачева М.И., Феденева И.Н., Вашукевич Н.В., Волков П.В., Савинова В.В., Базаров Б.А., Намсараев Д.В. Природная среда и человек в неоплейстоцене (Западное Забайкалье и Юго-Восточное Прибайкалье). Улан-Уде: Изд-во БНЦ СО РАН, 2003. 208 с.
- Лбова Л.В., Резанов И.Н., Коломиец В.Л., Савинова В.В., Дергачева М.И., Вашукевич Н.В., Перевалов А.В., Резанова В.П., Калмыков Н.П. Изменения природной среды и климата в позднем плейстоцене и голоцене в Центральной зоне Западного Забайкалья: по данным изучения георхеологических объектов онинского комплекса. В книге: Проблемы реконструкции климата и природной среды голоцена и плейстоцена Сибири. Новосибирск: Изд-во Ин-та археологии и этнографии СО РАН, 2000. Вып. 2. С. 288–301.
- Макеев А.О. Поверхностные палеопочвы лёссовых водоразделов Русской равнины. Москва: ЗАО «Молнет», 2012. 300 с.
- Методические указания по определению содержания и состава гумуса в почвах / сост. В.В. Пономарева, Т.А. Плотникова. Ленинград, 1975. 105 с.
- Орлов Д.С. Гумусовые кислоты почв и общая теория гумификации. Москва: Изд-во Моск. ун-та, 1990. 325 с.
- Орлов Д.С. Гумусовые кислоты почв. Москва: Изд-во Моск. ун-та, 1974. 334 с.
- Орлов Д.С., Бирюкова О.Н., Суханова Н.И. Органическое вещество почв Российской Федерации. Москва: Наука, 1996. 258 с.
- Орлов Д.С., Гришина Л.А. Практикум по химии гумуса. Москва: Изд-во Моск. ун-та, 1981. 273 с.
- Паркер С. Фотолюминесценция растворов. Москва: Мир, 1972. 510 с.
- Преч Э., Бюльманн Ф., Афвольтер К. Определение строения органических соединений. Таблицы спектральных данных. Москва: Мир; БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. 438 с.
- Седов С.Н., Хохлова О.С., Сеницын А.А., Коркка М.А., Русаков А.В., Ортега Б., Соллейро Э., Розанова М.С., Кузнецова А.М., Каздым А.А. Позднеплейстоценовые палеопочвенные серии как инструмент локальной палеогеографической реконструкции (на примере разреза Костенки 14) // Почвоведение. 2010. № 8. С. 938–955.
- Тарасевич Б.Н. ИК спектры основных классов органических соединений. Справочные материалы. Москва: МГУ, 2012. 55 с.
- Тихова В.Д., Фадеева В.П., Дергачева М.И., Шакиров М.М. Использование кислотного гидролиза для анализа состава гуминовых кислот разного генезиса // Журнал прикладной химии. 2008. Том 81. № 11. С. 1841–1846.
- Тихова В.Д., Шакиров М.М., Фадеева В.П., Дергачева М.И., Каллас Е.В., Орлова Л.А. Исследование гуминовых кислот ископаемых почв разного возраста аналитическими методами // Журнал прикладной химии. 2001. Том 74. № 8. С. 1343–1347.
- Трофимов С.Я., Якименко О.С., Седов С.Н., Зазовская Э.П., Дорофеева Е.И., Олейник С.А., Горшкова Е.И., Демин В.В. Особенности состава и свойств органического вещества почв древних поселений // Почвоведение. 2004. № 9. С. 1057–1066.

Тюрин И.В. Географические закономерности гумусообразования. В книге: Труды юбилейной сессии, посвященной 100-летию со дня рождения В.В. Докучаева. Москва: Изд-во АН СССР, 1949. С. 85–101.

Тюрин И.В. Органическое вещество почв и его роль в почвообразовании и плодородии. Учение о почвенном гумусе. Москва–Ленинград: Сельхозгиз, 1937. 287 с.

Учаев А.П., Некрасова О.А., Дергачева М.И. Диагностика палеоприродной среды лесостепной зоны Южного Урала на границе Брюнес-Матуяма // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Естественные науки. 2018. Том 42. № 2. С. 142–151. DOI: <https://doi.org/10.18413/2075-4671-2018-42-2-142-151>.

Феденева И.Н. Гумус и позднеплейстоценовое почвообразование в континентальных районах Евразии. Автореферат диссертации ... д-р биол. наук. Томск, 2004. 35 с.

Шейнкман В.С., Седов С.Н., Безрукова Е.В. Палеоэкология севера Западной Сибири в последнюю холодную эпоху плейстоцена: новые свидетельства и сценарии // Экосистемы: экология и динамика. 2022. Том 6. № 4. С. 71–88. DOI: <https://doi.org/10.24412/2542-2006-2022-4-71-88>.

Шейнкман В.С., Седов С.Н., Андроханов, В.А. Криогидроморфные палеопочвы севера Западной Сибири как индикаторы тёплых стадий позднего плейстоцена и их связь с ходом криогенеза // Почвы и окружающая среда. 2023. Том 6. № 3. e236. DOI: <https://doi.org/10.31251/pos.v6i3.236>.

Швец А.А. Методические указания к лабораторным работам по применению инфракрасной спектроскопии в химии. Ростов-на-Дону: ЮФУ, 1994. 25 с.

Эллиот А. Инфракрасные спектры и структура полимеров. Москва: Мир, 1972. 160 с.

Юдина Н.В., Тихова В.Д. Структурные особенности гуминовых кислот торфов, выделенных разными способами // Химия растительного сырья. 2003. № 1. С. 93–96.

Якименко О.С., Седов С.Н., Соллейро Д. Гумусное состояние современных и погребенных вулканических почв Мексики и его значение для палеогеографической интерпретации тейропочвенных серий // Почвоведение. 2007. № 3. С. 302–309.

Aseyeva E., Makeev A., Kurbanova F., Kust P., Rusakov A., Khokhlova O., Mihailov E., Puzanova T., Golyeva A. Paleolandscape reconstruction based on the study of a buried soil of the Bronze age in the Broadleaf forest area of the Russian Plain // Geosciences. 2019. Vol. 9. No. 3. P. 111. DOI: <https://doi.org/10.3390/geosciences9030111>.

Dergacheva M. Pedohumic method in paleoenvironmental reconstructions: an example from Middle Siberia // Quaternary International. 2003. Vol. 106–107. P. 73–78. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1040-6182\(02\)00162-3](https://doi.org/10.1016/S1040-6182(02)00162-3).

Dergacheva M., Fedeneva I., Bazhina N., Nekrasova O., Zenin V. Shestakovo site of Western Siberia (Russia): Pedogenic features, humic substances and paleoenvironment reconstructions for last 20–25 ka // Quaternary International. 2016 a. Vol. 420. P. 199–207. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.10.087>.

Dergacheva M., Nekrasova O., Uchaev A., Bazhina N. Sarykul paleosol in Southern Urals sediments (Russia) // Quaternary International. 2016 б. Vol. 420. P. 90–100. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.10.075>.

Dergacheva M., Uchaev A., Nekrasova O., Bazhina N. Permafrost soil humic acids and their use in diagnosis of environment of Pleistocene cold periods. Book of Abstracts: 5th European Conference on Permafrost (23 June – 01 July, 2018). Chamonix, 2018. P. 633–634.

Fedeneva I.N., Dergacheva M.I. Paleosoils as the basis of environmental reconstruction in Altai mountainous areas // Quaternary International. 2003. Vol. 106–107. P. 89–101. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1040-6182\(02\)00164-7](https://doi.org/10.1016/S1040-6182(02)00164-7).

Fedeneva I.N., Dergacheva M.I. Soilscape evolution of West Tien Shan during the Late Pleistocene based on humus properties of the Obi-Rakhmat archaeological site // Quaternary International. 2006. Vol. 156–157. P. 60–69. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2006.05.004>.

Lefort J.P., Dergacheva M.I., Danukalova G., Monnier J.L., Osipova E., Bazhina N. Evidence for five short "warming" episodes during MIS 6 at the westernmost tip of continental Europe: Contribution of pedogenesis. In book: Quaternary Stratigraphy in Karst and Cave Sediments: Program, Abstracts & Guide Book of INQUA-SEQS Conference (Postojna, Slovenia, 11–17 September, 2018) / Nadja Zupan Hajna, Andrej Mihevc, Magda Aljančič (editors). Ljubljana: ZRC Publishing, 2018. P. 43–44.

Makeev A.O. Pedogenic alteration of aeolian sediments in the upper loess mantles of the Russian Plain // Quaternary International. 2009. Vol. 209. No. 1–2. P. 79–94. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2009.03.007>.

Makeev A., Lebedeva M., Kaganova A., Rusakov A., Kust P., Romanis T., Yanina T., Kurbanov R. Pedosedimentary environments in the Caspian Lowland during MIS 5 (Srednaya Akhtuba reference section, Russia) // Quaternary International. 2021. Vol. 590. P. 164–180. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2021.03.015>.

Rusakov A., Makeev A., Khokhlova O., Kust P., Lebedeva M., Chernov T., Golyeva A., Popov A., Kurbanova F., Puzanova T. Paleoenvironmental reconstruction based on soil buried under Scythian fortification in the southern forest-steppe area of the East European Plain // *Quaternary International*. 2019. Vol. 502. P. 197–217. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2018.05.016>.

Sedov S., Sheinkman V., Bezrukova E., Zazovskaya E., Yurtaev A. Sartanian (MIS 2) Ice wedge pseudomorphs with hydromorphic pedosediments in the north of West Siberia as an Indicator for paleoenvironmental reconstruction and stratigraphic correlation // *Quaternary International*. 2022. Vol. 632. P. 192–205. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2022.05.002>.

Sheinkman V., Sedov S., Shumilovskikh S., Korkina E., Korkin S., Zinovyev E., Golyeva A. First results from the late pleistocene paleosols in northern Western Siberia: Implications for pedogenesis and landscape evolution at the end of MIS 3. *Quaternary International*. 2016. Vol. 418. P. 132–146. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.12.095>.

Watanabe M., Aoki K., Sakagami K. Humus accumulation in Holocene paleosols formed in Japanese tephra // *Catena*. 1998. Vol. 34. No. 1–2. P. 35–46. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(98\)00080-0](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(98)00080-0).

Watanabe M., Tanaka H., Sakagami K., Aoki K., Sugiyama S. Evaluation of Pg absorption strength of humic acids as a paleoenvironment indicator in buried paleosols on volcanic ash beds, Japan // *Quaternary International*. 1996. Vol. 34–36. P. 197–203. DOI: [https://doi.org/10.1016/1040-6182\(95\)00085-2](https://doi.org/10.1016/1040-6182(95)00085-2).

Welte E. Neuere Ergebnisse der Humusforschung // *Angewandte Chemie*. 1955. Vol. 67. No. 5. P. 153–155. DOI: <https://doi.org/10.1002/ange.19550670504>.

Поступила в редакцию 08.04.2024

Принята 18.04.2024

Опубликована 23.04.2024

Сведения об авторах:

Дергачева Мария Ивановна – доктор биологических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории биогеоценологии ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск, Россия); mid555@yandex.com; dergacheva@issa-siberia.ru

Бажина Наталья Леонидовна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории биогеоценологии ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск, Россия); bazhina@issa-siberia.ru

Шейнкман Владимир Семенович – кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник Института криосферы Земли ФГБУН ФИЦ Тюменский научный центр СО РАН (г. Тюмень, Россия); vlad.sheinkman@mail.ru

Седов Сергей Николаевич – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник Института криосферы Земли ФГБУН ФИЦ Тюменский научный центр СО РАН (г. Тюмень, Россия); ведущий исследователь Института геологии Национального автономного университета Мексики (г. Мехико, Мексика); serg_sedov@yahoo.com



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

Humus component of pedosediments at the end of the sartan cryochrome in the Nadym river basin (West Siberia)

© 2024 M. I. Dergacheva ¹, N. L. Bazhina ¹, S. N. Sedov ^{2,3}, V. S. Sheinkman ²

¹*Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Lavrentieva, 8/2, Novosibirsk, Russia. E-mail: mid555@issa-siberia.ru*

²*Earth Cryosphere Institute, Tyumen Scientific Center, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Malygina 86, Tyumen, Russia. E-mail: vlad.sheinkman@mail.ru*

³*Institute of Geology, National Autonomous University of Mexico, Ciudad Universitaria, Del. Coyoacán, CDMX, Mexico, Mexico. E-mail: serg_sedov@yahoo.com*

The aim of the study. To assess the potential of humus substances from the pedosediments in the polygonal ice wedges pseudomorphs as indicators of the paleoecological conditions of their formation during the period of their functioning within the surface soil, using the case of the Razdov object of the end of the Sartan cryochrome (corresponding to MIS-2) in the basin of Nadym River (West Siberia).

Important comment: In this paper the terms “humus”, “humus component of soils” and the “system of humus substances” are used as synonyms.

Location and time of the study. The research was conducted in the Nadym district of the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug (YaNAO), at the Razduv site 15 km to the north-east of the Nadym city, during the late summer 2018.

Methods: The study is based on a new methodological approach to the diagnostics of the bioclimatic conditions at the end of Sartanian cryochron in one of the northern territories of West Siberia, based on the humus substances of pedosediments which serve as indicators of paleoenvironment.

Main results. It was established that the applied indicator features of the formation conditions of the studied pedosediments, based on indicators of the composition and spectral properties of their humus component, correlated well with each other, in their totality reflecting the cold humid conditions of soil formation, similar to those for modern soils of different tundra subzones of the West Siberia.

Conclusions. The study of the specific features of composition, structure and properties of humus substances from the pedosediments in the pseudomorphs after polygonal ice wedges, dated back to the end of the Sartanian cryochron at the key section of Razduv and revealing the indicators of their formation conditions, demonstrated that the characteristics of the humus substances system and in particular one of its components, i.e. humic acids, obtained by independent methods, have high diagnostic significance for reconstructing paleoclimatic and paleoecological conditions of their formation. Characteristics of modern soils and paleosols from various parts of North Siberia, from northern Trans-Urals to the coastal lowlands in the north of Yakutia, were used as a recent reference dataset for diagnostics and reconstruction of the bioclimatic conditions of paleosol development on the land surface during MIS 2. It was confirmed that the studied samples, attributed to redeposited soil materials, i.e. pedosediments, due to their morphology in fact had undergone the phase of pedogenesis that is evidenced by the presence of humus substances, including humic acids with their typical outline of FTIR-spectra with a characteristic set of the absorption bands, individual ratio of the main structural elements and similar variation of the quantitative parameters of the fluorescence emission. The closest similarity of the composition and proportion of the main components of the humus substances system was found between the samples of the Sartanian pedosediments and the modern soils formed in the tundra conditions of West Siberia. The similarity of the main humus substances ratio, as well as the main structure-forming elements and values of all fluorescence characteristics of humic acids, especially for the samples with higher humus content and those affected by permafrost, was revealed. These results confirm that at the end of the Sartanian cryochron the pedogenesis in the vicinities of Razduv section was similar to that is now going on in the region located to the north of the study site.

Keywords: system of humus substances; humic acids; pedosediments from pseudomorphoses; diagnostics; bioclimatic conditions; end of the Sartanian cryochron; West Siberia.

How to cite: Dergacheva M.I., Bazhina N.L., Sedov S.N., Sheinkman V.S. Humus component of pedosediments at the end of the Sartanian cryochron in the Nadym River basin (West Siberia). *The Journal of Soils and Environment*. 2024. 7(1). e263. DOI: [10.31251/pos.v7i1.263](https://doi.org/10.31251/pos.v7i1.263)

FUNDING

The study was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. 121031700309-1 and project No. FWRZ-2021-0005).

REFERENCES

- Bazhina N.L., Dergacheva M.I. Fluorescent properties of humic acids in soils under different formation conditions. *The Journal of Soils and Environment*. 2021. Vol. 4. No. 4. e167. DOI: <https://doi.org/10.31251/pos.v4i4.167>. (in Russian).
- Bazhina N.L., Uchaev A.P., Nekrasova O.A., Valdaiskikh V.V. Composition of humus in soils at the bottom of the Eastern slope of the Polar Urals (Labytnangi). In book: *Palaeosols – keepers of information about the natural environment of the past. Materials of the X International Scientific Youth School on Paleosol Science* (Novosibirsk, August 1–6, 2019). Novosibirsk: Novosibirsk Publishing House, 2019. P. 9–14. (in Russian).
- Bellamy L. *Infrared specters of complex molecules*. Moscow: Foreign Literature Publishing House, 1963. 590 p. (in Russian).
- Bellamy L. *New data on the IR spectra of complex molecules*. Moscow: Mir Publ., 1971. 319 p. (in Russian).
- Vasiliev A.V., Grinenko E.V., Shchukin A.O., Fedulina T.G. *Infrared spectroscopy of organic and natural compounds: Textbook*. St. Petersburg: St. Petersburg State forestry academy, 2007. 54 p. (in Russian).
- Vladychensky A.S. *Features of mountain soil formation*. Moscow: Nauka Publ., 1998. 191 p. (in Russian).
- Goncharova O.Yu., Vladychensky A.S. Features of the humus state of cryoarid soils of South-Eastern Altai. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya 17: Pochvovedenie*. 2001. Vol. 17. No. 4. P. 13–18. (in Russian).

- Demkin V.A., Borisov A.V., Ryskov Y.G., Dergacheva M.I., Oleinik S.A. Soil evolution and climate change in the semidesert zone of Eastern Europe during the late Holocene. *Eurasian Soil Science*. 1998. Vol. 31. No. 2. P. 133–143.
- Dergacheva M.I. Soil organic matter: statics and dynamics. Novosibirsk: Nauka Publ., 1984. 153 p. (in Russian).
- Dergacheva M.I. The system of humic substances in soils: spatial and temporal aspects. Novosibirsk: Nauka Publ., Siberian Branch, 1989. 108 p. (in Russian).
- Dergacheva M.I. Archaeological soil science. Novosibirsk: Publishing house SB RAS Scientific Publishing House Center OIGGM, 1997. 227 p. (in Russian).
- Dergacheva M.I. Pedogumus method for reconstruction of paleoclimates. Problems of reconstruction of climate and natural environment of the Holocene and Pleistocene of Siberia. 1998a. P. 132–142. (in Russian).
- Dergacheva M.I. Reconstruction of soil formation conditions using the pedogumus method. In book: Ecology and soils: selected lectures 1–7 of the All-Russian School (1991–1997). Pushchino: Department of Scientific and Technical Information of the Pushchino Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 1998b. Vol. 1. P. 263–283. (in Russian).
- Dergacheva M.I. Humus memory of soils. In book: Memory of soils: soil as a memory of biosphere-geosphere-anthroposphere interactions. Moscow: URSS Publishing House, 2008. P. 530–560. (in Russian).
- Dergacheva M.I. The system of humic substances as a basis for the diagnosis of paleosols and reconstruction of the paleonatural environment. Novosibirsk: Publishing house SB RAS, 2018. 291 p. (in Russian).
- Dergacheva M.I. Traditions and innovations in the study of soil humus. *The Journal of Soils and Environment*. 2021. Vol. 4. No. 4. e172. DOI: <https://doi.org/10.31251/pos.v4i4.172>. (in Russian).
- Dergacheva M.I., Bazhina N.L., Ondar E.E., Ochur K.O., Ryabova N.N. Environmentally induced composition and properties of humic acids in soils of Western Tuva. *Vestnik of the Orenburg State University*. 2015. No. 10 (185). P. 166–169. (in Russian).
- Dergacheva M.I., Vashukevich N.V., Granina N.I. Humus and Holocene-Pliocene soil formation in the Cis-Baikal region. Novosibirsk: Publishing house SB RAS, "Geo", 2000. 206 p. (in Russian).
- Dergacheva M.I., Goncharova N.V., Fedeneva I.N. Humus of modern soils of the Altai Mountains as a basis for diagnosing the natural environment and climates of the past. The main patterns of global and regional changes in climate and natural environment in the Late Cenozoic of Siberia. Novosibirsk: Publishing House of the Institute of Archeology and Ethnography SB RAS, 2002. Vol. 1. P. 122–133. (in Russian).
- Dergacheva M.I., Dedkov V.S. The influence of freezing-thawing on the organic matter of soils in the Ob forest-tundra. *Russian Journal of Ecology*. 1977. No. 2. P. 23–32. (in Russian).
- Dergacheva M.I., Derevyanko A.P., Fedeneva I.N. Evolution of the natural environment of the Altai Mountains in the Late Pleistocene and Holocene: (reconstruction based on the characteristics of pedogenesis). Novosibirsk: Publishing House of the Institute of Archeology and Ethnography, 2006. 143 p. (in Russian).
- Dergacheva M.I., Laukhin S.A., Fedeneva I.N. Palaeogeographic reconstructions of the Chulym-Yenisei depression based on fossil soils using the example of the Kurtak archaeological region. In book: Methods of natural sciences in archaeological reconstructions. Novosibirsk: Publishing House of the Institute of Archeology and Ethnography SB RAS, 1995. Part 1. P. 106–115. (in Russian).
- Dergacheva M.I., Nekrasova O.A., Okoneshnikova M.V., Vasilyeva D.I., Gavrilov D.A., Ochur K.O., Ondar E.E. The ratio of elements in humic acids as a source of information about the natural environment of soil formation. *Sibirskij ekologicheskij zhurnal*. 2012. Vol. 19. No. 5. P. 667–676. (in Russian).
- Dergacheva M.I., Ryabova N.N. Correlative connections between the composition of humus and climatic indicators in the conditions of mountainous areas of southern Siberia. *Tomsk State University Journal*. 2005. No. 15. P. 68–71. (in Russian).
- Dergacheva M.I., Ryabova N.N. Ecological-humus connections of mountainous countries and the possibility of using them in the reconstruction of the paleonatural environment. In book: Soil as a connecting link in the functioning of natural and anthropogenically transformed ecosystems. Materials of the II International Conference. Irkutsk: Publishing house of Irkutsk State University, 2006. P. 37–42. (in Russian).
- Dergacheva M.I., Ryabova N.N., Ondar E.E. Ecological-humus connections in the conditions of Tuva as the basis for the reconstruction of the paleonatural environment. In book: Natural conditions, history and culture of Western Mongolia and adjacent regions. Materials of the VII International Conference (Kyzyl, 19–23 September, 2005). Kyzyl: Publishing house Tuva Institute for Integrated Development of Natural Resources SB RAS, 2005. Vol. 1. P. 134–137. (in Russian).

- Zakharova E.G., Dergacheva M.I., Kallas E.V., Bazhina N.L. Specificity of humus profiles of chernozems on the left bank of the Ob River within the Priob Plateau. *The Journal of Soils and Environment*. 2023. Vol. 6. No. 2. e214. DOI: <https://doi.org/10.31251/pos.v6i2.214>. (in Russian).
- Zolotareva B.N., Demkin V.A. Humus in paleosols of archaeological monuments in the dry steppes of the Volga-Don interfluvium. *Eurasian Soil Science*. 2013. Vol. 46. No. 3. P. 262–272. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229313030149>.
- Zolotareva B.N., Fominykh L.A., Kholodov A.L., Shirshova L.T. Composition of humus in chronosequences of buried soils in the tundra zone. *Eurasian Soil Science*. 2009a. Vol. 42. No. 5. P. 496–506. <https://doi.org/10.1134/S1064229309050044>.
- Zolotareva B.N., Fominykh L.A., Shirshova L.T., Kholodov A.L. The composition of humus in permafrost-affected soils of the Bol'shezemel'skaya and Kolyma tundra areas. *Eurasian Soil Science*. 2009b. Vol. 42. No. 1. P. 36–48. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229309010050>.
- Zykina V.S., Zykina V.S. Loess-soil sequence and evolution of the natural environment and climate of Western Siberia in the Pleistocene. *Novosibirsk: Geo Publ*, 2012. 477 p. (in Russian).
- Kononova M.M. Soil organic matter. Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1963. 315 p. (in Russian).
- Kononova M.M., Belchikova N.P. Experience in characterizing the nature of soil humic acids using spectroscopy. *Reports of the USSR Academy of Sciences*. 1950. Vol. 72. No. 1. P. 125. (in Russian).
- Korkina E.A., Rusakov A.V., Golovleva Yu.A. Dynamics of the biogeochemical carbon cycle in the Pleistocene-Holocene period. In book: *Climate change and carbon neutrality: challenges and opportunities. Collection of materials of the All-Russian scientific-practical conference (Khanty-Mansiysk, June 10, 2022)*. Khanty-Mansiysk: Limited Liability Company "Pechatny Mir Khanty-Mansiysk", 2022. P. 23–28. (in Russian).
- Kurbanova F.G. Soils of archaeological sites as indicators of the dynamics of the natural environment of the center of the Russian Plain in the second half of the Holocene. *Abstract of Dissertation ... Cand. of Biol. Sci. Moscow*, 2021. 26 p. (in Russian).
- Lavrik N.L. Study of polydisperse properties of humic acid molecules using luminescent spectroscopy. *Khimiya v interesakh ustoychivogo razvitiya*. 2003. Vol. 11. No. 5. P. 751–755. (in Russian).
- Lbova L.V., Rezanov I.N., Kalmykov N.P., Kolomiets V.L., Dergacheva M.I., Fedeneva I.N., Vashukevich N.V., Volkov P.V., Savinova V.V., Bazarov B.A., Namsaraev D.V. Natural environment and man in the Neopleistocene (Western Transbaikalia and South-Eastern Baikal region). Ulan-Ude: Publishing house BSC SB RAS, 2003. 208 p. (in Russian).
- Lbova L.V., Rezanov I.N., Kolomiets V.L., Savinova V.V., Dergacheva M.I., Vashukevich N.V., Perevalov A.V., Rezanova V.P., Kalmykov N.P. Changes in the natural environment and climate in the Late Pleistocene and Holocene in the Central zone of Western Transbaikalia: according to the study of geoarchaeological objects of the Onin complex. In book: *Problems of reconstruction of climate and natural environment of the Holocene and Pleistocene of Siberia*. Novosibirsk: Publishing House of the Institute of Archeology and Ethnography SB RAS, 2000. Vol. 2. P. 288–301. (in Russian).
- Makeev A.O. Surface paleosols of loess watersheds of the Russian Plain. Moscow: Molnet Publ., 2012. 300 p. (in Russian).
- Guidelines for determining the humus content in soils / compiled by V.V. Ponomareva, T.A. Plotnikova. Leningrad, 1975. 105 p. (in Russian).
- Orlov D.S. Humic acids of soils and the general theory of humification. Moscow: Publishing house Mosk. Univ., 1990. 325 p. (in Russian).
- Orlov D.S. Humic acids of soils. Moscow: Publishing house Mosk. Univ., 1974. 334 p. (in Russian).
- Orlov D.S., Biryukova O.N., Sukhanova N.I. Organic matter of soils of the Russian Federation. Moscow: Nauka Publ., 1996. 258 p. (in Russian).
- Orlov D.S., Grishina L.A. Workshop on the chemistry of humus. Moscow: Publishing house Mosk. Univ., 1981. 273 p. (in Russian).
- Parker S. Photoluminescence of solutions. Moscow: Mir Publ., 1972. 510 p. (in Russian).
- Prech E., Buhlmann F., Affolter K. Determination of the structure of organic compounds. Spectral data tables. Moscow: Mir Publ.; BINOMIAL. Knowledge Laboratory, 2006. 438 p. (in Russian).
- Sedov S.N., Solleiro E., Khokhlova O.S., Sinitsyn A.A., Korkka M.A., Rusakov A.V., Ortega B., Rozanova M.S., Kuznetsova A.M., Kazdym A.A. Late pleistocene paleosol sequences as an instrument for the local paleographic

reconstruction of the Kostenki 14 key section (Voronezh oblast) as an example. *Eurasian Soil Science*. 2010. Vol. 43. No. 8. P. 876–892. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229310080053>.

Tarasevich B.N. IR spectra of the main classes of organic compounds. Reference materials. Moscow: MSU, 2012. 55 p. (in Russian).

Tikhova V.D., Fadeeva V.P., Dergacheva M.I., Shakirov M.M. Analysis of humic acids from various soils using acid hydrolysis. *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2008. Vol. 81. No. 11. P. 1957–1962. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1070427208110177>.

Tikhova V.D., Shakirov M.M., Fadeeva V.P., Dergacheva M.I., Kallas E.V., Orlova L.A. Elemental content and functional group analysis of humic acids in fossilized soils of different ages. *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2001. Vol. 74. No. 8. C. 1380–1384. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1013783002596>.

Trofimov S.Ya., Yakimenko O.S., Sedov S.N., Dorofeeva E.I., Gorshkova E.I., Zazovskaya E.P., Oleinik S.A., Demin V.V. Composition and properties of organic matter in the soils of ancient slavic settlements in the forest zone. *Eurasian Soil Science*. 2004. Vol. 37. No. 9. P. 927–936.

Tyurin I.V. Geographical patterns of humus formation. In book: Proceedings of the anniversary session dedicated to the 100th anniversary of the birth of V.V. Dokuchaeva. Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1949. P. 85–101. (in Russian).

Tyurin I.V. Soil organic matter and its role in soil formation and fertility. The doctrine of soil humus. Moscow–Leningrad: Selkhozgiz Publ., 1937. 287 p. (in Russian).

Uchaev A.P., Nekrasova O.A., Dergacheva M.I. Diagnostics of the paleonatural environment of the forest-steppe zone of the Southern Urals on the border of Brunus Matuyama. *Belgorod State University Scientific Bulletin. Natural sciences*. 2018 a. Vol. 42. No. 2. P. 142–151. DOI: <https://doi.org/10.18413/2075-4671-2018-42-2-142-151>. (in Russian).

Fedeneva I.N. Humus and Late Pleistocene soil formation in continental regions of Eurasia. Abstract of Dissertation ... Dr. of Biol. Sci. Tomsk, 2004. 35 p. (in Russian).

Sheinkman V.S., Sedov S.N., Bezrukova E.V. Paleoecology of the North of West Siberia in the last epoch of the Pleistocene: new evidences and scenarios. *Ecosystems: Ecology and Dynamics*. 2022. Vol. 6. No. 4. P. 71–88. DOI: <https://doi.org/10.24412/2542-2006-2022-4-71-88>. (in Russian).

Sheinkman V.S., Sedov S.N., Androkhyanov, V.A. Cryohydromorphic paleosols in the north of West Siberia as indicators of the warm stages of the Late Pleistocene and their link to the cryogenesis development. *The Journal of Soils and Environment*. 2023. Vol. 6. No. 3. e236. <https://doi.org/10.31251/pos.v6i3.236>. (in Russian).

Shvets A.A. Guidelines for laboratory work on the use of infrared spectroscopy in chemistry. Rostov-on-Don: Southern Federal University, 1994. 25 p. (in Russian).

Elliott A. Infrared specks and the structure of polymers. Moscow: Mir Publ., 1972. 160 p. (in Russian).

Yudina N.V., Tikhova V.D. Structural features of peat humic acids isolated by different methods. *Khimija rastitel'nogo syr'ja*. 2003. No. 1. P. 93–96. (in Russian).

Yakimenko O.S., Sedov S.N., Solleiro E. The humus status of modern and buried volcanic soils in Mexico and its role in the paleogeographic interpretation of tephra-paleosol sequences. *Eurasian Soil Science*. 2007. Vol. 40. No. 3. P. 274–280. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229307030052>.

Aseyeva E., Makeev A., Kurbanova F., Kust P., Rusakov A., Khokhlova O., Mihailov E., Puzanova T., Golyeva A. Paleolandscape reconstruction based on the study of a buried soil of the Bronze age in the Broadleaf forest area of the Russian Plain. *Geosciences*. 2019. Vol. 9. No. 3. P. 111. DOI: <https://doi.org/10.3390/geosciences9030111>.

Dergacheva M. Pedohumic method in paleoenvironmental reconstructions: an example from Middle Siberia. *Quaternary International*. 2003. Vol. 106–107. P. 73–78. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1040-6182\(02\)00162-3](https://doi.org/10.1016/S1040-6182(02)00162-3).

Dergacheva M., Fedeneva I., Bazhina N., Nekrasova O., Zenin V. Shestakovo site of Western Siberia (Russia): Pedogenic features, humic substances and paleoenvironment reconstructions for last 20–25 ka. *Quaternary International*. 2016 a. Vol. 420. P. 199–207. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.10.087>.

Dergacheva M., Nekrasova O., Uchaev A., Bazhina N. Sarykul paleosol in Southern Urals sediments (Russia). *Quaternary International*. 2016 б. Vol. 420. P. 90–100. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.10.075>.

Dergacheva M., Uchaev A., Nekrasova O., Bazhina N. Permafrost soil humic acids and their use in diagnosis of environment of Pleistocene cold periods. Book of Abstracts: 5th European Conference on Permafrost (23 June – 01 July, 2018). ChamoniX, 2018. P. 633–634.

- Fedeneva I.N., Dergacheva M.I. Paleosols as the basis of environmental reconstruction in Altai mountainous areas. *Quaternary International*. 2003. Vol. 106–107. P. 89–101. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1040-6182\(02\)00164-7](https://doi.org/10.1016/S1040-6182(02)00164-7).
- Fedeneva I.N., Dergacheva M.I. Soilscape evolution of West Tien Shan during the Late Pleistocene based on humus properties of the Obi-Rakhmat archaeological site. *Quaternary International*. 2006. Vol. 156–157. P. 60–69. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2006.05.004>.
- Lefort J.P., Dergacheva M.I., Danukalova G., Monnier J.L., Osipova E., Bazhina N. Evidence for five short "warming" episodes during MIS 6 at the westernmost tip of continental Europe: Contribution of pedogenesis. In book: *Quaternary Stratigraphy in Karst and Cave Sediments: Program, Abstracts & Guide Book of INQUA-SEQS Conference (Postojna, Slovenia, 11–17 September, 2018)* / Nadja Zupan Hajna, Andrej Mihevc, Magda Aljančič (editors). Ljubljana: ZRC Publishing, 2018. P. 43–44.
- Makeev A.O. Pedogenic alteration of aeolian sediments in the upper loess mantles of the Russian Plain. *Quaternary International*. 2009. Vol. 209. No. 1–2. P. 79–94. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2009.03.007>.
- Makeev A., Lebedeva M., Kaganova A., Rusakov A., Kust P., Romanis T., Yanina T., Kurbanov R. Pedosedimentary environments in the Caspian Lowland during MIS 5 (Srednaya Akhtuba reference section, Russia). *Quaternary International*. 2021. Vol. 590. P. 164–180. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2021.03.015>.
- Rusakov A., Makeev A., Khokhlova O., Kust P., Lebedeva M., Chernov T., Golyeva A., Popov A., Kurbanova F., Puzanova T. Paleoenvironmental reconstruction based on soil buried under Scythian fortification in the southern forest-steppe area of the East European Plain. *Quaternary International*. 2019. Vol. 502. P. 197–217. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2018.05.016>.
- Sedov S., Sheinkman V., Bezrukova E., Zazovskaya E., Yurtaev A. Sartanian (MIS 2) Ice wedge pseudomorphs with hydromorphic pedosediments in the north of West Siberia as an Indicator for paleoenvironmental reconstruction and stratigraphic correlation. *Quaternary International*. 2022. Vol. 632. P. 192–205. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2022.05.002>.
- Sheinkman V., Sedov S., Shumilovskikh S., Korkina E., Korkin S., Zinovyev E., Golyeva A. First results from the late pleistocene paleosols in northern Western Siberia: Implications for pedogenesis and landscape evolution at the end of MIS 3. *Quaternary International*. 2016. Vol. 418. P. 132–146. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.12.095>.
- Watanabe M., Aoki K., Sakagami K. Humus accumulation in Holocene paleosols formed in Japanese tephra. *Catena*. 1998. Vol. 34. No. 1–2. P. 35–46. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(98\)00080-0](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(98)00080-0).
- Watanabe M., Tanaka H., Sakagami K., Aoki K., Sugiyama S. Evaluation of Pg absorption strength of humic acids as a paleoenvironment indicator in buried paleosols on volcanic ash beds, Japan. *Quaternary International*. 1996. Vol. 34–36. P. 197–203. DOI: [https://doi.org/10.1016/1040-6182\(95\)00085-2](https://doi.org/10.1016/1040-6182(95)00085-2).
- Welte E. Neuere Ergebnisse der Humusforschung. *Angewandte Chemie*. 1955. Vol. 67. No. 5. P. 153–155. DOI: <https://doi.org/10.1002/ange.19550670504>.

Received 08 April 2024
Accepted 18 April 2024
Published 23 April 2024

About the authors:

Maria I. Dergacheva – Doctor of Biological Sciences, Professor, Principal Researcher in the Laboratory of Biogeocenology of the Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); mid555@yandex.ru; dergacheva@issa-siberia.ru

Natalia L. Bazhina – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher in the Laboratory of Biogeocenology in the Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); bazhina@issa-siberia.ru

Vladimir S. Sheinkman – Candidate of Geographical Sciences, Leading Researcher in the Earth Cryosphere Institute, Tyumen Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tyumen, Russia); vlad.sheinkman@mail.ru

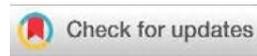
Sergey N. Sedov – Candidate of Biological Sciences, Leading Researcher in the Earth Cryosphere Institute, Tyumen Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tyumen, Russia); Leading Researcher in the Institute of Geology, National Autonomous University of Mexico, Ciudad Universitaria, Del. Coyoacán, CDMX (Mexico, Mexico); serg_sedov@yahoo.com

The authors read and approved the final manuscript



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

УДК 631.4

<https://doi.org/10.31251/pos.v7i1.245>

Некоторые биологические особенности почв Куйдусунской впадины Оймяконского нагорья

© 2024 А. А. Данилова ¹, П. П. Данилов ², В. С. Макаров ^{2,3}, А. А. Винокуров²¹Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий РАН, Новосибирская область, р.п. Краснообск, 630501, Россия. E-mail: danilova7alb@yandex.ru²Научно-исследовательский институт прикладной экологии севера СВФУ имени М.К. Аммосова, проспект Ленина, 43, г. Якутск, Республика Саха (Якутия), 634055, Россия. E-mail: DanPP@mail.ru³Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, ул. Мерзлотная 36, г.Якутск, Республика Саха (Якутия), 677010, Россия. E-mail: mvs379@yandex.ru

Цель исследования – общая микробиологическая характеристика катенального ряда почв Куйдусунской впадины Оймяконского нагорья.

Место и время проведения. Район исследования – окрестности п. Томтор (N63°15'41,94"; E143°10'26,91") Оймяконского района Республики Саха (Якутия). Образцы почв отобрали осенью 2011 г. на основных позициях катены. Длина катены ~38 км, высота над ур. м. нижней точки 727 м, верхней – 821 м. Почвы – мерзлотный подбур (лес); мерзлотная каштановая (остепенённый луг), мерзлотная аллювиальная дерновая (настоящий луг); мерзлотная торфяная низинная (заболоченный луг).

Методы. Содержание подвижного органического вещества (ПОВ) в почве определяли по оптической плотности вытяжки фосфатным буфером (1/15М, рН 6,8). Число колониеобразующих единиц (КОЕ) определяли на стандартных средах МПА, КАА, Чапека. Оценку функционального спектра микробного комплекса почвы провели методом мультисубстратного тестирования с применением 24 субстратов. Уреазную активность почвы оценивали по разложению мочевины с колориметрическим определением продукта реакции – аммония. Все показатели изучили по слоям почвы толщиной 10 см до глубины 40 см.

Основные результаты. Влажность образцов почвы в слое 0–10 см вниз по катене на момент отбора проб изменялась от 5 до 20%, содержание ПОВ – от 2 до 6 г С /кг. В слое 0–10 см наибольшее накопление ПОВ отмечено в почве под настоящим лугом. Там же обнаружено наибольшее число КОЕ (150 млн/г почвы) на разбавленной среде МПА. Установлено увеличение доли клеток, находящихся в стадии покоя, в ряду почв от нижней позиции катены к верхней. В этом же ряду отмечено повышение показателя олиготрофности сообщества. Наибольшая метаболическая активность отмечена в почве под заболоченным лугом, наименьшая – под лесом. Обогащённость органического вещества микроорганизмами возрастала в ряду почв под лугом заболоченным – лугом настоящим – лугом остепенённым, в то время как показатель удельной активности микробиоты снижался. Уреазная активность почвы выявлена преимущественно в слое 0–10 см; при переходе в нижележащий слой показатель снижался более чем в 500 раз.

Заключение. Общие черты биологических свойств изученных почв соответствовали известным закономерностям, установленным для катенального ряда почв в других почвенно-климатических условиях. Особенность изученных почв заключалась в крайне резкой дифференциации микробиологического профиля. Падение числа КОЕ при переходе из верхнего 0–10 см слоя в нижние достигало 30–60 раз, ферментативной активности – до 500 раз. Особенность культивируемой части микробного сообщества почвы также заключалась в абсолютном преобладании КОЕ актиномицетов в почве под остепенённым лугом. На этом варианте актиномицеты преобладали не только на среде КАА, где часто учитывают эту группу микроорганизмов, но и на средах МПА и Чапека. Установленные закономерности отражают повышение микробиологической переработанности почвенного органического вещества от заболоченной почвы к остепенённой при снижении удельной активности микробиоты в этом же ряду почв.

Ключевые слова: Оймякон; катена; органическое вещество; число КОЕ; ферментативная активность; мультисубстратное тестирование.

Цитирование: Данилова А.А., Данилов П.П., Макаров В.С., Винокуров А.А. Некоторые биологические особенности почв Куйдусунской впадины Оймяконского Нагорья // Почвы и окружающая среда. 2024. Том 7. № 1. e245. DOI: [10.31251/pos.v7i1.245](https://doi.org/10.31251/pos.v7i1.245)

ВВЕДЕНИЕ

Последние годы интерес к экосистемам высоких широт существенно возрос в связи с изменением климата. На территории Республики Саха (Якутия) актуальность проблемы также обусловлена повышением техногенной нагрузки на северные территории (Данилова, Петров, 2022а).

Фрагментарные описания почв Оймяконского нагорья проводились в середине XX века в рамках обследования территории, прилегающей к федеральной автодороге Р-504 (М-56) «Колыма», которая протянулась от Якутска до Магадана, берега Охотского моря, пересекая хребты Сэттэ-Дабан, Сунтар-Хаята, Оймяконское нагорье и южные отроги хребта Черского (Оконешникова и др., 2021).

Почвы наиболее населённой территории Оймяконского нагорья – Куйдусунской впадины – были описаны в рамках ботанических исследований в 1975 г. (Скрябин, Коноровский, 1975). Первые систематические исследования этих почв были проведены в 2006–2008 гг. под руководством профессора Д.Д. Саввинова. По результатам исследований были выделены 14 типов почв и составлена карта-схема степени их антропогенной нарушенности (Винокуров, 2012). Биологическая составляющая почв полярных областей Якутии остаётся слабоизученной. Опубликованы сведения по техногенно-нарушенным экосистемам в контексте рекультивационных мероприятий: Анабарский район (Данилова и др., 2019), Усть-Янский район (Данилова, Петров, 2022б). При этом сведений по биологии почв естественных экосистем до сих пор крайне недостаточно. Опубликованы первые сведения по биологии почв низовий Колымы (Щелчкова и др., 2017).

Цель работы – сделать общую микробиологическую характеристику катенального ряда почв Куйдусунской впадины Оймяконского нагорья.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Почвы были отобраны осенью 2011 г. на типичных элементах рельефа. Длина катены ~38 км, высота над уровнем моря нижней точки 727 м, верхней – 821 м.

Для исключения разночтений, что неизбежно при описании слабоизученной территории, приводим таблицу названий исследуемых почв в соответствии с различными схемами классификации почв РФ.

Таблица 1

Список типов мерзлотных почв Куйдусунской впадины Оймяконского нагорья, отобранных для микробиологического анализа

№ разреза	Фитоценоз	Предварительное название почвы ¹	по Еловской (1987) ²	Классификация и диагностика почв СССР (1977) ³	Классификация и диагностика почв России (2004) ⁴	IUSS Working Group WRB (2014) ⁵
Р-10-07	Лес	Мерзлотный подбур	Мерзлотный подбур	Не предусмотрены	Сухоторфяно-подбур	Cambic Cryosols (fragic, murshic)
Р-15-08	Остепённый луг	Тёмно-каштановая щепнистая суглинистая.	Мерзлотная каштановая	Каштановая	Петрозём гумусовый	Skeletal Cryosols (aridic)
Р-2-08	Настоящий луг	Мерзлотная пойменная дерново-луговая	Мерзлотная аллювиальная дерновая	Аллювиальная луговая кислая	Аллювиальная серогумусовая (дерновая) глеевая	Cambic Cryosols (fluvic)
Р-9-07	Заболоченный луг	Мерзлотная торфянистая пирогенно-преобразованная	Мерзлотная торфяная низинная	Торфяная болотная низинная	Торфяная эуторфная	Folic Cryosols

Примечание.

1 – Предварительное полевое название по Д.Д. Саввинову. 2 – Классификация и диагностика мерзлотных почв Якутии (1987). 3 – Классификация и диагностика почв СССР (1977). 4 – Классификация и диагностика почв России (2004). 5 – IUSS Working Group WRB (2014).

Разрез Р-10-07. Почва – **мерзлотный подбур** (по Еловской, 1987), в соответствии с международной классификацией IUSS Working Group WRB (2014, далее – WRB, 2014) – Cambic Cryosols (Fragic, Murshic). Зональный тип почв, развитый под мохово-лишайниковым листовничником на элювии и делювии разных пород. Приурочены к водоразделам и их склонам. Выражен криогенный бугристый микрорельеф. Почвы оттаивают на небольшую глубину, в зависимости от экспозиции склона, механического состава, характера напочвенного покрова. Характеризуются очень равномерной окраской минеральной толщи. Признаки оглеения отсутствуют.

Описание почвенного разреза Р-10-07, заложенного в 5 км к западу от с. Орто-Балаган в урочище Оттоох на южной экспозиции возвышенности под разреженным листовничником с кустарниковым покровом из ивы и кустарниковой берёзки:

А (0–3 см) – задернованный, свежий, темно-коричневый, слитый, бесструктурный, корни растений, переход резкий, граница ровная, присутствуют зольные остатки;

АВ (3–15 см) – тяжёлый суглинок, сухой, грязно-серый, белесоватый оттенок, комковато-зернистой структуры, плотный, корни растений, переход постепенный, граница ровная;

В (15–55 см) – тяжёлый суглинок, грязно-серый, сухой, глыбистой структуры, слитый, мелкие ржаво-охристые прожилки, корни растений, переход постепенный, граница ровная;

С (55–75 см) – лёгкий суглинок, свежий, слегка оглеен, криотурбированный, бесструктурный, мозаичного цвета, слитый;

Мерзлота – 75 см и глубже.

Разрез Р-15-08. Почва – **мерзлотная каштановая** (по Еловской, 1987), в соответствии с WRB (2014) – Skeletic Cryosols (Aridic). Зональный тип почв развивается в условиях экстраконтинентального климата на южных склонах средних сопкок и высоких надпойменных террас под остепенённой растительностью среди зональной лесной растительности на делювиальных отложениях плотных пород «верхоянской» свиты, включающей сланцы, аргиллиты, алевролиты, песчаники древних террас. Почвообразующие породы отличаются значительной щебнистостью. Почвы образуются под влиянием физических процессов выветривания, малой нормы осадков, обуславливающих непромывной водный режим, склоновых процессов. Травостой низкорослый (10–15 см), разреженный (30–50%), урожайность сухой массы 3–6 ц/га. Почвы и растительность степных склонов ранее рассматривали Е.М. Наумов, Н.А. Андреев (1963), С.З. Скрябин, А.К. Коноровский (1975), В.И. Волковинцер (1978). М.А. Бронникова с соавторами (2022) предложили ввести подобные почвы в качестве самостоятельного генетического типа в классификации почв РФ под названием *криоаридные почвы*.

Описание разреза Р-15-08, заложенного в 2 км к северо-западу от с. Томтор на южной экспозиции 2/3 склона сопки:

А (0–3 см) – суглинок, слабо задернован, свежий, темно-каштановый, бесструктурный, рыхлый, мелкий щебень, не вскипает, переход постепенный, граница ровная;

АВ (3–15 см) – суглинок, сухой, светлее предыдущего горизонта, мелкозернистой структуры, щебень мелкий, не вскипает, уплотнённый, переход ясный, граница ровная;

В (15–38 см) – суглинок лёгкий, сухой, пылит, светлый со слоистыми коричневыми горизонтальными прожилками, щебень крупный, мелкозернистой структуры, плотный, не вскипает;

Д_с (38 см и глубже) – щебень.

Почва имеет укороченный щебнистый профиль, слоистость которого определяется солифлюкционными процессами, редко в минеральной части с нижней стороны щебёнки накопление карбонатной плесени. Растительность степная: несколько видов полыни, пострел многонадрезанный, кипрей узколистный, смолевка ползучая, незабудочник мелковетвистый, осока стоповидная, астра альпийская, камнеломка колючая, вероника седая, лапчатка якутская, овсяница колымская.

Разрез Р-2-08. Почва – **мерзлотная аллювиальная дерновая** (по Еловской, 1987), в соответствии с WRB (2014) – Cambic Cryosols (Fluvis), в регионе рассматриваются как зонально-интразональные образования. Почвы кислые, реже нейтральные, глеевый процесс слабо выражен, не засолены. Формируются под настоящими и слабо остепенёнными лугами. Растительность – тысячелистник обыкновенный, лапчатка гусиная, лапчатка прилистниковая, подорожник большой, колокольчик Лангсдорфа, осока твердоватая, овсяница колымская, кострец безостый. Режим затопления не устойчив по годам.

Описание разреза Р-2-08, заложенного на пойме на левом берегу ручья Буор-Урэх восточнее села Томтор под пологом малоостепенённого луга с колками лиственницы и ивы:

А_д (0–3 см) – дернина, сухая, черно-коричневая, переплетена корнями, плотная, мелкозернистой структуры, слитое, не вскипает, переход не ясный, граница ровная;

АВ (3–8 см) – супесь, сухая, светло-коричневая, уплотнённая, бесструктурный, не вскипает, переход постепенный, граница ровная;

В (8–20 см) – песок, сухой, светло-коричневый светлее предыдущего, уплотнённый, бесструктурный, не вскипает, слабо слоистый, гумусовые натеки по трещинам. Переход заметный, граница ровная;

С (20 см и глубже) – галечник с песком, мерзлота не обнаружена.

Общий рельеф слабо выраженный полигонально-западинный, разрез заложен на вершине полигона. Почвы характеризуются легким гранулометрическим составом. Имеют слабокислую реакцию по всему профилю. Гумусовый горизонт насыщен растительными остатками. В минеральной части профиля встречаются погребённые слои с высоким содержанием гумуса.

Разрез Р-9-07. Почва – мерзлотная торфяная низинная (по Еловской, 1987), в соответствии с WRB (2014) – Follic Cryosols, относится к интразональным почвам. Формируются в условиях холодного почвенного климата и избыточного увлажнения, застоя атмосферной влаги, поверхностного и надмерзлотного стока. Ранее образовавшиеся торфяные залежи консервируются мерзлотой, оттаивая не более чем на 50 см. Растительный покров представлен злаково-осоковыми ассоциациями и сфагновыми мхами. Особенность образования торфяных почв региона заключается в чередовании процессов накопления торфа и сгорания его с накоплением зольных остатков. В результате образуются псевдоминеральные горизонты.

Описание разреза Р-9-07, заложенного в 5 км к западу от с. Орто-Балаган в урочище Оттоох на ровном по рельефу сенокосном лугу под злаково-осоковой ассоциацией на берегу водоёма, быстро заполняемого водой:

О (0–2 см) – моховый, плохо разложившиеся остатки растений;

T₁ (2–8 см) – оторфованная дернина, влажная, светло-коричневая, бесструктурная, слитая, корни и остатки растений, зольные остатки торфяных пожаров, переход постепенный, граница ровная;

T₂ (8–17(20) см) – торфяник разложившийся, мокрый, темно-коричневый, бесструктурный, плотный, корни растений, процесс заболачивания, переход постепенный, граница ровная;

T₃ (17(20)–48 см) – сильноразложившийся торфяник с запахом сероводорода, темно-коричневый, мокрый, слабо-уплотнённый, бесструктурный, близкое залегание мерзлоты;

Мерзлота – 48 см и глубже.

На рисунке 1 представлен общий вид мест отбора проб и морфология почвенного профиля объектов исследования. Наименьшее содержание гумуса отмечено в почве под остепенным лугом; под лугом настоящим и заболоченным распределение органического вещества по профилю было неравномерным (табл. 2). Наиболее кислой была почва под настоящим лугом, наименее – под остепенённым.

Таблица 2

Некоторые свойства исследуемых почв (Винокуров, 2012)

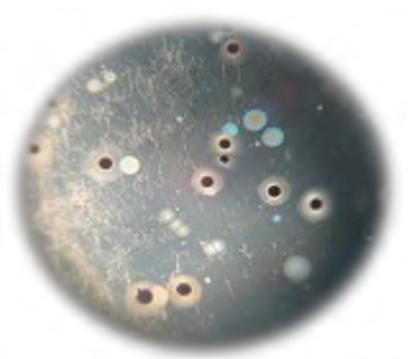
Горизонт (глубина, см)	рН водный	Гумус, %	N общий, %	Обменные основания, мг-экв/100г	
				Ca ²⁺	Mg ²⁺
Мерзлотный подбур					
A _d (0–5)	5,6	36,7	1,85	11,42	10,31
A ₁ (5–15)	5,1	14,7	0,20	9,22	4,16
AB (B) (25–40)	5,3	13,5	0,44	7,33	2,35
B (BC) (65–70)	4,9	10,2	0,37	8,78	2,80
Мерзлотная каштановая*					
A (0–3)	6,2	7,1	0,30	19,98	5,92
AB (3–15)	6,9	2,5	0,20	14,95	2,60
B (15–38)	7,4	1,3	0,20	23,76	7,26
D _{Ca} (38 и глубже)	щебень				
Мерзлотная аллювиальная дерновая					
A (5–15)	4,7	22,3	1,31	2,10	1,81
AB (15–25)	4,7	0,5	0,04	1,21	0,72
B (30–40)	4,9	23,9	1,18	5,49	1,81
C (56–63)	5,1	10,4	0,44	3,84	1,09
Мерзлотная торфяная низинная					
T ₁ (0–2)	5,5	24,9	1,37	6,59	5,43
T ₂ (2–7)	5,1	9,3	0,65	3,84	1,63
T ₃ (12–35)	4,6	4,9	0,17	2,89	0,90

Примечание.

*Химический состав каштановой почвы по С.З. Скрыбину и А.К. Коноровскому (1975).



Мерзлотный подбур



Мерзлотная каштановая



Мерзлотная аллювиальная дерновая



Мерзлотная торфяная низинная

Рисунок 1. Общий вид мест отбора проб, профиль почв и морфология колоний микроорганизмов, выросших на поверхности агаризованной среды (МПА), стереолупа МБС10 × 6.

Температурный режим этих почв подробно изучен в средней (под настоящим лугом) и верхней (под лесом) позициях катены при помощи логгеров температуры DS1921G-F5 (Dallas Semiconductor Corp.), установленных в глубинах 0, 10, 20, 40 см. Регистрация данных шла в течение двух периодов: с октября 2016 г. по сентябрь 2017 г. и с сентября 2020 г. по август 2021 г., непрерывно с интервалом в 3 ч. Установлено, что даже в период максимального прогрева почвы в июле–августе в глубине 20 см

температуры не достигают 10°C . Среднегодовая температура на этой глубине колебалась в пределах $-3,7$ – $6,7^{\circ}\text{C}$. Как и ожидалось, на долинной части катены температурный режим почвы был относительно более мягким в сравнении с плакором: среднегодовая температура на первой позиции составляла от $-3,7$ до $-5,3^{\circ}\text{C}$, на второй – $-4,8$ до $-6,7^{\circ}\text{C}$. Наиболее резкие колебания температуры почвы в течение года наблюдались на глубине 10 см и составляли от -30 до 15°C (рис. 2).

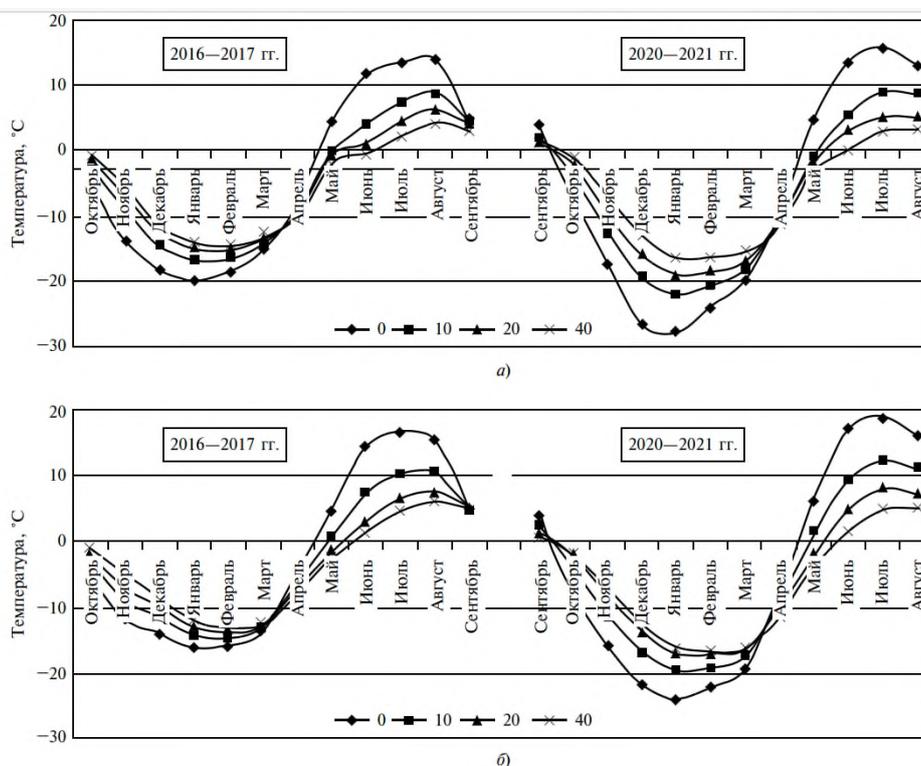


Рисунок 2. Среднемесячные температуры по слоям мерзлотного подбуря (а) и мерзлотной аллювиальной дерновой (серогумусовой) почвы (б) (Макаров и др., 2022).

Пробы почв отбирали в трёхкратной повторности с зачищенных стенок разрезов. Микробиологические анализы проводили в лаборатории плодородия почв СФНЦА РАН в течение месяца после отбора проб. До анализов образцы хранили в состоянии естественной влажности при температуре не выше 5°C . Анализировали образцы в трёхкратной аналитической повторности.

Относительное содержание **подвижного органического вещества (ПОВ)** в почве определяли при помощи измерения оптической плотности вытяжки фосфатным буфером по Соренсену 1/15 М, рН = 6,8, соотношение почва: раствор 1:5, инкубация при 30°C течение 24 ч., светофильтр 492 нм.

Число **колониобразующих единиц (КОЕ)** определяли на стандартных агаризованных средах КАА, Чапека, а также на МПА в стандартной и разбавленной в 30 раз концентрациях. Оценку функционального спектра микробного комплекса почвы провели при помощи **метода мультисубстратного тестирования (МСТ)** (Горленко, Кожевин, 2005) в модификации (Данилова и др., 2019). Модификация метода связана с необходимостью учёта спектра активности сапротрофной части микробного сообщества почвы, быстро реагирующей на изменение состояния питательных источников в почве. Подготовку образцов к анализу проводили по обычной схеме для посева на агаризованные среды: 2 г почвы растирали в 20 мл стерильного фосфатного буфера по Соренсену с рН = 6,5. Суспензию взбалтывали на лабораторной качалке в течение 15 мин., подвергали центрифугированию в течение 20 мин. при 4000 об/мин. Инокулят объёмом 0,1 мл из разведения 1:10 вносили в 0,5 мл среды, содержащей минеральную основу среды Чапека, субстрат, пептон и индикатор трифенилтетразолийхлорид (ТТХ). Конечная концентрация субстрата в реакционной смеси составляла 0,2%, пептона – 0,1%. Использовали набор из 24 тест-субстратов: дульцит, инозит, маннит, сорбит, глицерин, мальтоза, лактоза, раффиноза, глюкоза, арабиноза, рамноза, ксилоза, галактоза, фруктоза, сахароза, крахмал, ацетат натрия, цитрат калия, цитрат аммония, малат калия, тартрат калия-натрия, мочевины, карбоксиметил целлюлоза, ТВИН-80. Инкубацию проводили 40 ч при температуре 28°C . Окрашенность среды оценивали в баллах. Полученные функциональные спектры анализировали по:

(1) сумме баллов оценки активности процесса по 24 субстратам (суммарная активность); (2) выравненности спектра (равномерность утилизации субстратов согласно формуле: $E = 1/\sum (p_i)^2$, где p_i – доля балла активности утилизации каждого субстрата в общей сумме баллов по всем субстратам. Поскольку скорость развития окраски реакционной смеси зависит от исходного числа микробных клеток в посевном материале, необходима поправка на исходную неравнозначность посевного материала по микробной заселённости. Поэтому одновременно с постановкой МСТ проводили посев той же суспензии на агаризованную среду следующего состава (г/л): сухая питательная среда МПА – 0,3, пептон – 0,6, глюкоза – 0,1. Состав среды приближен к таковому органической основы реакционной смеси МСТ. Инкубацию чашек проводили в тех же условиях, что и пробирки МСТ. Учёт проводили через 72 часа после посева. Анализ проводили из 3 отдельных навесок каждого образца, с каждой навески заседали по 2-3 пробирки. При отсутствии достоверных различий между вариантами опыта числовые значения показателей усредняли, что существенно снижало вероятность случайных колебаний расчётных величин. Рассчитывали величину **удельной метаболической активности (УМА)** сапротрофного микробного сообщества, представляющего собой отношение суммы баллов оценки метаболической активности по 24 субстратам к числу КОЕ, млн/г почвы. Уреазную активность почвы оценивали по (Методы ..., 1980).

Статистическую обработку экспериментальных данных провели с использованием пакета программ Statistica. Анализ различия факторных средних выполнили методом дисперсионного анализа на уровне значимости $\alpha = 0,05$. В таблице и рисунках приведено среднее арифметическое значение со стандартным отклонением. Группировку объектов исследования при МСТ провели при помощи кластерного анализа (k-means clustering).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Влажность почвы на момент отбора проб в целом соответствовала общим закономерностям распределения влаги по катене (рис. 3). Содержание ПОВ по объектам исследования также соответствовало известным закономерностям: в толще почвы мощностью 0–40 см показатель был наибольшим в болотной почве. В верхнем 0–10 см слое наибольшее накопление ПОВ отмечено в почве под настоящим лугом. При движении вверх по катене показатель закономерно снижался, что очевидно связано с низкой продуктивностью растительного покрова.

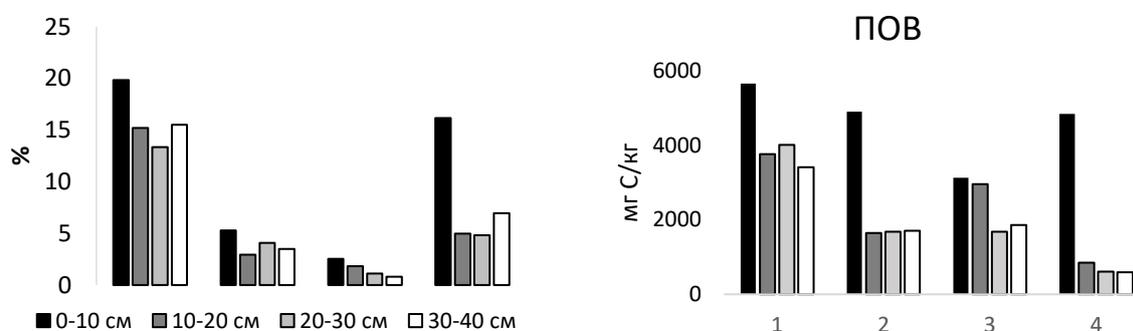


Рисунок 3. Влажность почвы и содержание подвижного органического вещества (ПОВ) в почве, переходящего в фосфатный буфер с рН 6,8. Обозначения: 1 – почва мерзлотная торфяная низинная (заболоченный луг), 2 – мерзлотная аллювиальная дерновая (настоящий луг), 3 – мерзлотная каштановая (остепенённый луг), 4 – мерзлотный подбур (лес).

Микробный пейзаж почв, полученный на поверхности твёрдой питательной среды (МПА), четко различался морфологически (см рис. 1). Сапротрофный комплекс болотной почвы был представлен мелкими однообразными колониями. В луговой почве отмечали достаточно большое разнообразие бактериального населения, представленного относительно крупными колониями разнообразной формы и окраски. В остепенённой почве отмечали преобладание актиномицетов с различной окраской колоний (белые, серые, сиреневые). Микробный пейзаж лесной почвы был представлен тяжёлыми стерильного грибного мицелия и мелкими однообразными колониями бактерий. Таким образом, на морфологическом уровне удалось отметить чёткое различие в составе микробного населения изученных почв.

Общее число КОЕ в почве оценивали в сильно разбавленной среде МПА, что позволило обнаружить достаточно большое число микробных КОЕ, достигающее в луговой почве (0–10 см) 150

млн/г почвы. В целом наиболее заселённой была почва в пределах верхнего 0–10 см слоя. Несколько более равномерная заселённость по профилю отмечалась только в болотной почве (табл. 3).

Таблица 3

Культивируемая часть микробного сообщества исследуемых почв

Фитоценоз	Слой, см	Утилизирующие азот органический, млн КОЕ/г			Утилизирующие азот минеральный (КАА), млн КОЕ /г		КАА/МПА	Грибы (среда Чапека), тыс. КОЕ /г
		А	Б	А/Б*	Всего	Из них актиномицеты		
Заболоченный луг	0–10	3,2 ± 0,2	19,2 ± 2,8	6	6,6 ± 2,4	не обн.	2	47 ± 6,3
	10–20	30,7 ± 1,2	27,5 ± 2,3	1	1,8 ± 1,0	не обн.	0,1	11 ± 3,8
Настоящий луг	0–10	26,3 ± 1,9	150 ± 6,5	6	18,7 ± 6,5	2	0,7	30 ± 3,4
	10–20	1,6 ± 1,2	4,7 ± 1,2	3	2 ± 1,5	един.	1,2	17 ± 2,7
Остепенённый луг	0–10	11,6 ± 0,8	64,7 ± 15,4	6	26,8 ± 5,9	15	2,3	100 ± 17,0
	10–20	0,4 ± 0,3	5,6 ± 3,3	13	0,7 ± 0,1	един.	1,5	30 ± 5,1
Лес	5–10	1,2 ± 0,7	60 ± 12,4	60	0,7 ± 0,1	един.	0,1	41 ± 2,8
	10–20	0,2 ± 0,06	1,2 ± 0,5	6	0,9 ± 0,1	не обн.	4,5	6 ± 0,6

Примечание.

* – отношение числа КОЕ в среде МПА стандартной концентрации (А) и разбавленной в 30 раз (Б) для сравнения олиготрофности сапротрофной части микробного сообщества почв по катене.

Разбавленная среда МПА позволила учесть не только максимальное число КОЕ, но и скорость появления колоний на поверхности среды. При движении от болотной почвы к лесной повышалось относительное содержание медленнорастущих бактерий (доля колоний, вырастающих в пределах 3–7 дней после посева). То есть, микробный комплекс почв в этом направлении постепенно обогащался клетками, находящимися в стадии покоя, что вполне закономерно в связи с ужесточением гидротермического режима почв (рис. 4).

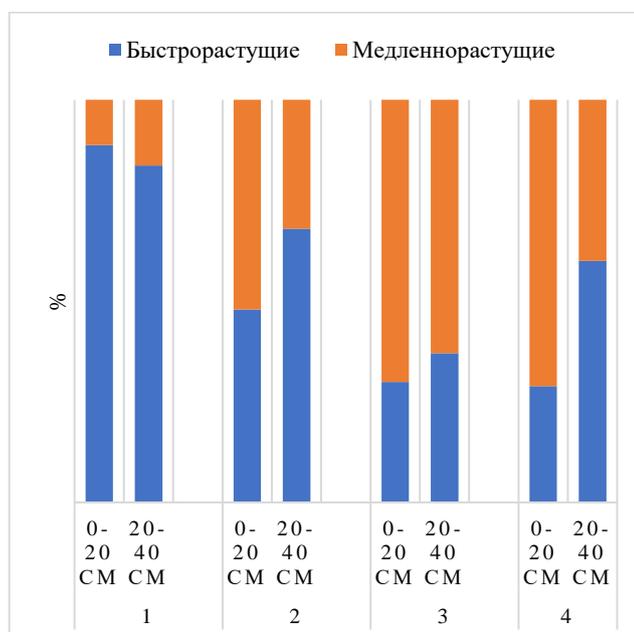


Рисунок 4. Дифференциация сапротрофного микробного сообщества почвы по скорости роста на поверхности агаризованной среды. Быстрорастущие – учитываемые в пределах 3 дней после посева, медленнорастущие – в пределах 3–7 дней после посева. Обозначения: 1 – почва мерзлотная торфяная низинная (заболоченный луг), 2 – мерзлотная аллювиальная дерновая (настоящий луг), 3- мерзлотная каштановая (остепенённый луг), 4 – мерзлотный подбур (лес).

Для составления сравнительного представления об особенностях числа КОЕ в исследуемом объекте приводим соответствующие данные для почв аласной катены на Лено-Виллойском междуречье (табл. 4). В почвах исследуемого объекта микробная обсеменность слоя почвы глубже 10 см была ниже, чем в аласных почвах, тогда как в верхнем 0–10 см показатель был существенно выше. В целом, в исследуемых почвах распределение микробных клеток в почве как по катене, так и по слоям почвы было более закономерным в сравнении с аласной системой почв, где в динамику показателя существенный вклад вносило засоление.

Таблица 4

Число колониеобразующих единиц (КОЕ) в почвах аласной катены (Лено-Амгинское междуречье), млн КОЕ/г (Данилова и др., 2017)

Слой, см	Гидротермический пояс аласа, фитоценоз			Межаласье
	Нижний, заболоченный луг	Средний, настоящий луг	Верхний, остепненный луг	Лес
0–10	6,9	11,1	18,9	8,2
10–20	4,2	5,6	6,6	23,7
20–30	1,7	1,2	3,2	3,7
30–40	2,3	0,8	1,4	3,8

Учёт числа КОЕ на стандартных питательных средах разной концентрации позволил оценить степень олиготрофности микробного комплекса исследуемых почв (см. табл. 3). Так, число КОЕ, учитываемое на богатой среде МПА, было ниже такового на бедной в 6–13 раз. При этом отметим, что данный показатель в слое почвы до 10 см практически не зависел от типа почвы, тогда как в слое 10–20 см отмечалось его закономерное повышение от болотной почвы к остепенённой до 13 см, что является, вероятно, отражением уменьшения в этом ряду почв запасов доступных источников питания для сапротрофной микробиоты.

Число КОЕ, утилизирующих минеральные источники азота (КАА), возрастало с нижней точки катены к верхней. Однако это обстоятельство вряд ли может быть свидетельством обогащения почвы минеральным азотом. Повышение числа КОЕ на этой среде было связано с повышением в составе микробного комплекса зачатков актиномицетов, наибольшее число и разнообразие которых отмечено в остепенённой почве. Эта закономерность вполне понятна и связана с понижением влажности почвы. Как известно, актиномицеты наиболее конкурентноспособны именно в этих условиях. Из сказанного следует, что общепринятый в почвенной биологии коэффициент минерализации, представляющий собой соотношение числа КОЕ на средах КАА и МПА, в нашем случае может применяться с должной мерой осторожности.

Число КОЕ, учитываемое на среде Чапека со стрептомицином, на нашем объекте также имело свои особенности. Повышение показателя в остепенённой почве в сравнении с болотной и луговой было связано с развитием на среде актиномицетов.

Таким образом, основная черта микробной заселённости почв объектов исследования заключалась в крайне резкой дифференциации микробиологического профиля. Падение числа КОЕ при переходе из верхнего 0–10 см слоя в нижние достигало 30–60 раз. Особенность культивируемой части микробного сообщества почвы также заключалась в преобладании актиномицетов в почве под остепенённым лугом. На этом варианте актиномицеты преобладали не только на среде КАА, где обычно учитывают эту группу микроорганизмов, но и на средах МПА и Чапека. Обилие актиномицетов в культивируемой части микробного сообщества сближает исследуемую почву под остепенённым лугом с каштановыми почвами сухостепных и пустынных областей. Черты подобного сходства по морфологическим показателям почвенного профиля отмечали первые исследователи почв Оймьяконского нагорья (Скрябин, Коновский, 1975).

Следующий этап наших исследований заключался в оценке пищевых предпочтений микробного комплекса почвы. Для этих целей микробному населению предлагали спектр источников пищи (субстратов) от самых доступных (глюкоза) до сложных (целлюлоза) и оценивали степень их потребления в лабораторных условиях. Чем интенсивнее окраска ячейки, тем активнее потребляется субстрат. Степень окрашенности оценивали в баллах. Совокупность этих пиков составляет функциональный спектр микробного комплекса почвы (рис. 5). Картина получилась вполне закономерная. Наибольшая активность отмечена в под заболоченным лугом, наименьшая – под остепенённым.

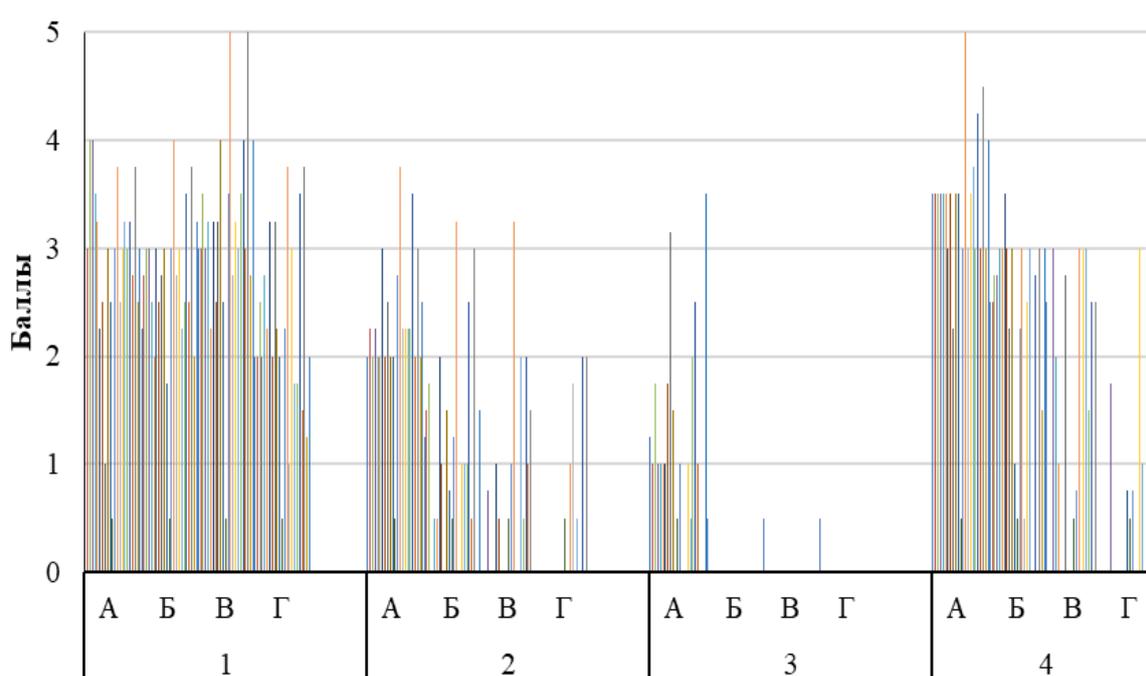


Рисунок 5. Функциональный спектр сапротрофного микробного сообщества катенарного ряда почв. Обозначения: 1 – почва мерзлотная торфяная низинная (заболоченный луг), 2 – мерзлотная аллювиальная дерновая (настоящий луг), 3 – мерзлотная каштановая (остепененный луг), 4 – мерзлотный подбур (лес); слои почвы (см): А – 0–10, Б – 10–20, В – 20–30, Г – 30–40.

При интерпретации функционального спектра сапротрофного сообщества мы исходили из следующего положения: регистрируемый в момент анализа спектр активности утилизации групп субстратов микробным сообществом является отражением состава имеющихся в почве источников питательных веществ, то есть показателем адаптированности сообщества к потреблению того или иного спектра соединений (Banning et al., 2012, Kaneda et al., 2019). На первом этапе анализа результатов оценивали общий метаболический профиль сообщества без учёта числа КОЕ в инокуляте. Активность потребления углеводов в слое 0–10 см под заболоченным и настоящим лугами и под лесом оценивалась как высокая и видимо отражала отсутствие лимитирования сообщества по поступлению в среду лёгкой фракции органических веществ в условиях относительно высокой продуктивности растительности. Слабая развитость растительного покрова на остепенённом склоне обусловила более низкую активность утилизации углеводов микробным сообществом каштановой почвы. Анализ данных в более нижних слоях очевидно указывает на различие состава растительной биомассы поступающей в почву. Так в болотной почве состав биомассы по содержанию углеводов видимо был относительно равномерным до глубины 40 см. Резкое снижение показателя в луговой почве отражает очевидно соответствующее снижение поступления в почву углеводной фракции ОВ. Под лесом показатель вниз по профилю снижался вполне закономерно и плавно (рис. 6).

По утилизации спиртов особенности профиля в целом совпадали со спектром потребления углеводов.

По утилизации солей органических кислот профиль луговой почвы был сходен с профилем лесной почвы, с той лишь разницей, что под лесом глубина активного слоя была меньше.

Специфичность метаболического профиля каждого из вариантов достаточно хорошо была заметна по потреблению полимеров. Мощность наиболее активного слоя почвы снижалась в ряду болото – лес – луг – степь, что очевидно отражало специфику состава поступающих питательных источников для микробного сообщества.

Несколько иные закономерности отметили при расчёте метаболической активности микробиоты с учетом числа КОЕ в исходной вытяжке. В почве заболоченного луга удельная метаболическая активность (УМА) сообщества оказалась ниже, чем общая, то есть уровень последней обеспечивался за счёт высокого числа КОЕ с низкой метаболической активностью, что может быть свидетельством заторможенности минерализационных процессов в болотной почве вследствие высокого отношения С:N в поступающем растительном опаде. Сходная закономерность отмечена в слое 0–10 см почв настоящего луга (рис. 7 а, б).

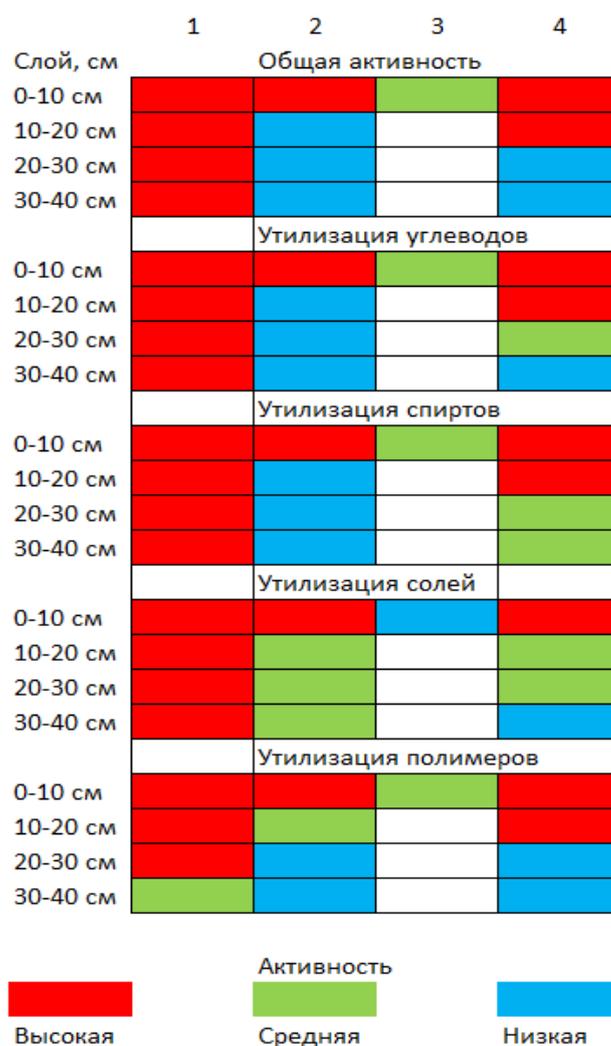


Рисунок 6. Метаболический профиль сапротрофного микробного сообщества почв. Обозначения: 1 – почва мерзлотная торфяная низинная (заболоченный луг), 2 – мерзлотная аллювиальная дерновая (настоящий луг), 3 – мерзлотная каштановая (остепенённый луг), 4 – мерзлотный подбур (лес). Ячейки без окраски – активность не обнаружена.

Дополнительным показателем направленности биологических процессов является относительная обогащённость общего и подвижного органического вещества почвы ($C_{орг}$, ПОВ) клетками микроорганизмов. Для этого рассчитали число КОЕ, соответствующее единице $C_{орг}$ и ПОВ. Как видно из графика, в слое почвы 0–10 см показатель растёт от болотной почвы к остепенённой, что, согласно Мишустину (1975), означает повышение глубины переработанности почвенного органического вещества (рис.7 в, г).

По результатам расчёта показателей для удельной активности микробного комплекса, наибольшая активность отмечена для лесной почвы, где показатели были несоизмеримы с остальными типами почв. Анализ данных, полученных для катены, свидетельствует, что наибольшая удельная активность приходится на ПОВ луговой почвы, что вполне закономерно. Показатели, присущие болотной почве, вероятно, свидетельствуют о процессах консервации биомассы, остепенённой – о крайней заторможенности микробиологических процессов (рис. 7 ж, з).

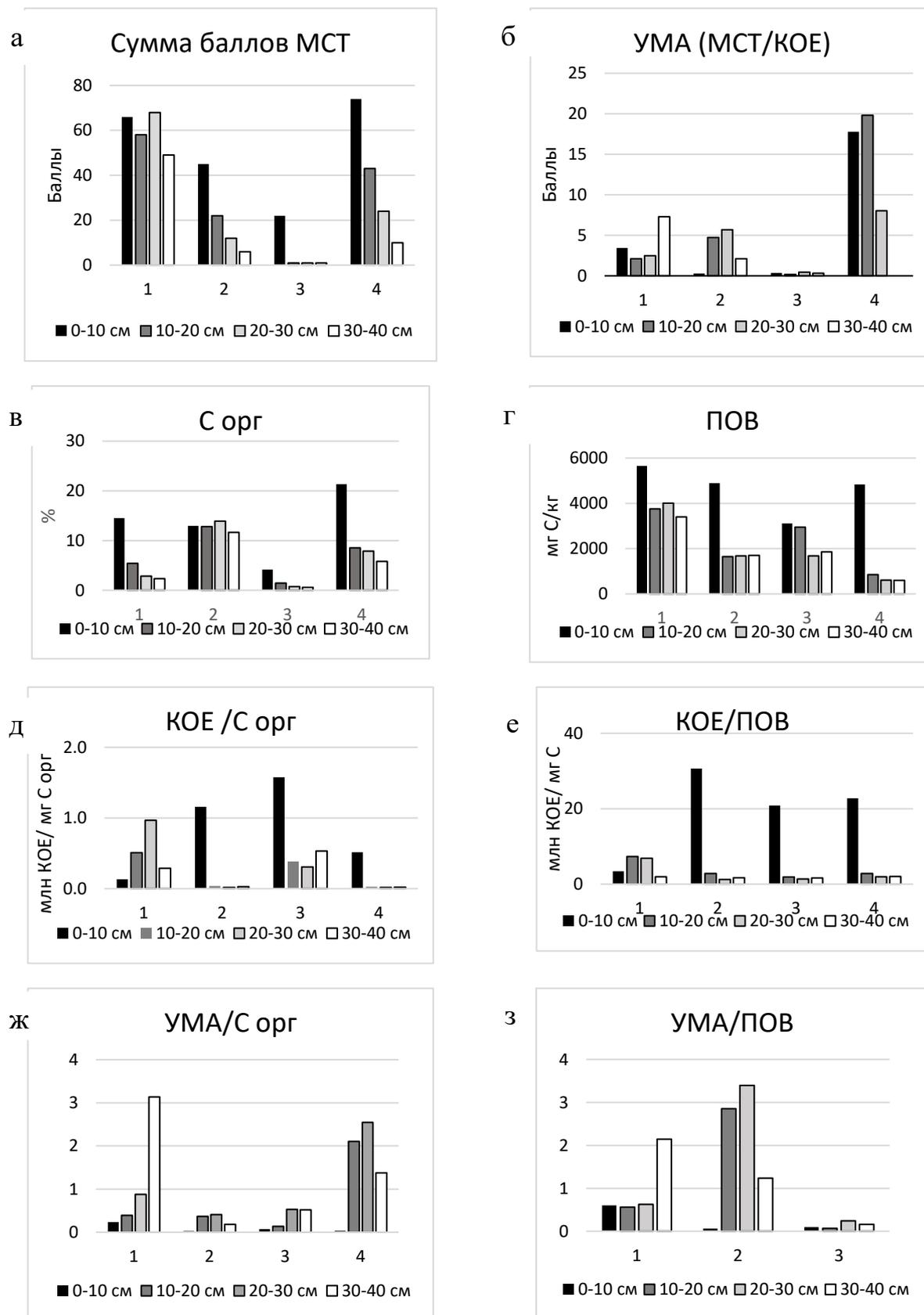


Рисунок 7. Число колониеобразующих единиц (КОЕ) и их активность, соответствующие единице органического вещества почвы. Обозначения: 1 – почва мерзлотная торфяная низинная (болото), 2 – мерзлотная аллювиальная дерновая (луг), 3 – мерзлотная каштановая (остепенённый луг), 4 – мерзлотный подбур (лес). УМА – удельная метаболическая активность: сумма баллов МСТ/число КОЕ, млн. МСТ – мультисубстратное тестирование. ПОВ – подвижное органическое вещество.

Следующей самостоятельной характеристикой биологической активности почвы является ферментативная активность, которая отражает, в том числе, вклад корневой системы высших растений в почвообразовательный процесс. По нашим результатам, величина показателя видимо определялась мощностью слоя распространения корневой системы растений и преимущественно ограничивалась слоем 0–10 см (табл. 5). В луговой почве показатель достигал наибольших значений. При этом при переходе в более нижний слой снижался в более чем в 500 раз.

Таблица 5

Уреазная активность исследуемых почв, мг N-NH₄/г за 18 ч

Слой, см	Позиция катены, фитоценоз			
	Нижняя, заболоченный луг	Средняя, настоящий луг	Средняя, остепненный луг	Верхняя, лес
0–10	15,6 ± 0,9	227 ± 38	6,6 ± 0,25	41,8 ± 3,9
10–20	2,5 ± 0,3	0,4 ± 0,2	0,6 ± 0,2	2 ± 0,2
20–30	0	0	0	0,5 ± 0,1
30–40	0	0,4 ± 0,2	0	0,2 ± 0,1

Для сравнения приводим соответствующие данные для аласных почв, из которых видно, что верхний 0–10 см почв из Оймьякона более активен, чем у аласных почв. При этом различия между слоями 0–10 и 10–20 см в последних более сглажены (табл. 6).

Таблица 6

Уреазная активность почв аласной катены (Лено-Амгинское междуречье) (Данилова и др., 2017)

Слой, см	Гидротермический пояс аласа, фитоценоз			Межаласье, лес
	Нижний, заболоченный луг	Средний, настоящий луг	Верхний, остепненный луг	
0–10	23 ± 1	25 ± 1	15 ± 2	10 ± 2,5
10–20	1 ± 1	9 ± 1	7 ± 1	25 ± 1
20–30	4 ± 1	10 ± 1	0	10 ± 1
30–40	1 ± 1	5 ± 1	0	2 ± 1

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены новые сведения о свойствах малоизученных почв северо-востока Евразии. Общая картина распределения показателей биологической активности почв в исследуемой катене вполне соответствует известным закономерностям, обнаруженным в катенах других регионов. Основная отличительная черта изученных почв заключается в крайней укороченности микробиологического профиля: все основные микробиологические процессы локализованы в пределах слоя 0–10 см.

БЛАГОДАРНОСТИ

Статья посвящается светлой памяти нашего учителя, выдающегося исследователя мерзлотных почв профессора Дмитрия Дмитриевича Саввинова.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № 5.3638.2011 и проекта РФ FSRG-2020-0018).

ЛИТЕРАТУРА

Бронникова М.А., Герасимова М.И., Конопляникова Ю.В., Гуркова Е.А., Черноусенко Г.И., Голубцов В.А., Ефимов О. Е. Кривоаридные почвы как генетический тип в классификации почв России: география, морфология, диагностика // Почвоведение. 2022. № 3. С. 263–280. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0032180X22030030>.

Винокуров А.А. Антропогенное воздействие на почвы пастбищ Оймьяконского нагорья северо-востока Якутии. Диссертация ... канд. биол. наук. Якутск, 2012. 124 с.

Волковинцер В.И. Степные кривоаридные почвы. Новосибирск: Наука, 1978. 207 с.

Горленко М.В., Кожевин П.А. Мультистратное тестирование природных микробных сообществ. Москва: Макс Пресс, 2005. 288 с.

Данилова А.А., Легостаева Я.Б., Сивцева Н.Е., Петров А.А. Способ оценки устойчивости сапротрофного микробного сообщества почвы методом мультисубстратного теста // Патент № 2678876. 2019. Бюл. № 2.

Данилова А.А., Петров А.А. Изучение техногенно нарушенных почв Якутии // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2022а. Том 27. № 4. С. 547–560. DOI: <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-4-547-560>.

Данилова А.А., Петров А.А. Опыт визуализации почвенно-микробиологических процессов в световом микроскопе. Сообщение 2. Наблюдение за участием грибов в образовании нового органического вещества почвы // Почвы и окружающая среда. 2022б. Том 5. № 3. е185. DOI: <https://doi.org/10.31251/pos.v5i3.185>.

Данилова А.А., Саввинов Г.Н., Гаврильева Л.Д., Данилов П.П., Ксенофонтова М.И., Петров А.А. Кратковременная изоляция деградированного пастбища в криолитозоне: почвенно-микробиологические аспекты // Аридные экосистемы. 2017. Том 23. № 3 (72). С. 66–74.

Еловская Е.Г. Классификация и диагностика мерзлотных почв Якутии. Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1987. 172 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.

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.

Методы почвенной микробиологии и биохимии. Москва: МГУ, 1980. 200 с.

Макаров В.С., Саввинов Г.Н., Гололобова А.Г. Температурный режим мерзлотных почв Куйдусунской впадины Оймяконского нагорья // Проблемы региональной экологии. 2022. № 5. С. 71–77. DOI: <https://doi.org/10.24412/1728-323X-2022-5-71-77>.

Мишустин Е.Н. Ассоциации почвенных микроорганизмов. Москва: Наука, 1975. 106 с.

Оконешникова М.В., Иванова А.З., Десяткин Р.В., Николин Е.Г. Почвы высотных поясов хребта Сунтар-Хаята: морфология, свойства, классификация // Почвоведение. 2021. № 5. С. 558–567 DOI: <https://doi.org/10.31857/S0032180X21050142>.

Скрябин С.З., Коновровский А.К. Растительность и почвы степей среднего течения Индигирки // Ботанические материалы по Якутии. Якутск: Изд-во ЯФ СО АН СССР, 1975. С. 38–47.

Щелчкова М.В., Давыдов С.П., Федоров-Давыдов Д.Г., Давыдова А.И., Боескоров Г.Г., Соломонов Н.Г. Первые данные о биологической активности таежно-степных почв низовьев Колымы // Доклады академии наук. 2017. Том 477. № 1. С. 118–122. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0869565217310255>.

Banning N.C., Lalor B.M., Cookson W.R., Grigg A.H., Murphy D.V. Analysis of soil microbial community level physiological profiles in native and postmining rehabilitation forest: Which substrates discriminate? // Applied Soil Ecology. 2012. Vol. 56. P. 27–34. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2012.01.009>.

Kaneda S., Křišťufek V., Baldrian P., Malý S., Frouz J. Changes in functional response of soil microbial community along chronosequence of spontaneous succession on post mining forest sites evaluated by Biolog and SIR methods // Forests. 2019. Vol. 10. No. 11. P. 1005. DOI: <https://doi.org/10.3390/f10111005>.

IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome, 2014, update 2015. 181 p.

Поступила в редакцию 12.01.2024

Принята 26.02.2024

Опубликована 07.03.2024

Сведения об авторах:

Данилова Альбина Афанасьевна – доктор биологических наук, главный научный сотрудник лаборатории плодородия почв СФНЦА РАН (р.п. Краснообск, Новосибирская область, Россия); Danilova7alb@yandex.ru

Данилов Петр Петрович – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник Научно-исследовательского института прикладной экологии Севера им. профессора Д.Д. Саввинова СВФУ им. М.К. Аммосова (Якутск, Россия); DanPP@mail.ru

Макаров Виктор Семенович – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник Научно-исследовательского института прикладной экологии Севера им. профессора Д.Д. Саввинова СВФУ им. М.К. Аммосова; старший научный сотрудник Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН (Якутск, Россия); mvs379@yandex.ru

Винокуров Андрей Андреевич – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник Научно-исследовательского института прикладной экологии Севера им. профессора Д.Д. Саввинова СВФУ им. М.К. Аммосова (Якутск, Россия); andvin80@mail.ru

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.



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

Some biological properties of the Kuidusun depression soils of Oymyakon

© 2024 A. A. Danilova ¹, P. P. Danilov ², V. S. Makarov ^{2,3}, A. A. Vinokurov ²

¹*Siberian Federal Scientific Centre of Agro-BioTechnologies of the RAS, Krasnoobsk, Novosibirsk Region, Russia.
E-mail: Danilova7alb@yandex.ru*

²*D.D. Savvinov Research Institute of Applied Ecology of the North, M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia. E-mail: DanPP@mail.ru*

³*P.I. Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russia.
E-mail: mvs379@yandex.ru*

The aim of the study. To investigate some microbiological properties of the catenal series of soils in the Kuidusun depression of the Oymyakon Highlands.

Location and time of the study. The study area is located in the vicinity of the Tomtor village (N63°15'41.94"; E143°10'26.91") of the Oymyakonsky district of the Republic of Sakha (Yakutia, Russia). Soil samples were collected in the fall of 2011 at the main positions of the catena. The length of the catena is 38 km, the altitude a.s.l. is 727–821m. Soils are classified as Cambic Cryosols (fragic, murshic), (forest); Skeletic Cryosols (aridic), (steppe meadow), Cambic Cryosols (fluvic), (typical meadow); Follic Cryosols (swampy meadow).

Methods. The content of labile soil organic matter (LOC) was determined photocalorimetrically in soil extracts with phosphate buffer (1/15 M, pH 6,8). The number of colony-forming units (CFU) was determined using standard MPA, KAA, and Czapek media. The functional spectrum of the soil microbiota was assessed using the community level physiological profile (CLPP) method. All properties were studied in 10 cm thick layers to a depth of 40 cm. Soil urease activity was assessed by ammonium production from urea.

Results. At the time of sampling moisture content of soil samples down the catena increased from 5 to 20%, whereas the LOC content increased from 2 to 6 g C/kg. In the 0–10 cm layer, the greatest accumulation of LOC was observed in the soil under a typical meadow. The highest number of CFU (150 million/g soil) in a dilute MPA medium was also found there. An increase in the proportion of CFU in the dormant state was revealed in the soil series from the lower position of the catena to the upper one. In the same series, an increase in the oligotrophic index of the community was noted. The highest metabolic activity was observed in the soil under a swampy meadow, whereas the lowest was shown by the soil under a forest. The enrichment of soil organic matter with microbiota cells increased in the series of soils *f* in the following order: a swampy meadow – a typical meadow – a steppe meadow, whereas the specific activity of the microbiota decreased. Urease activity of the soil was detected mainly in the 0–10 cm layer; in the underlying layers the activity was more than 500 times lower.

Conclusions. The biological properties of the studied soils corresponded to the known patterns established for the catenal series of soils in other soil and climatic conditions. The peculiarity of the studied soils was related to the extremely sharp differentiation of the microbiological profile. The absolute predominance of actinomycetes CFU in the soil under the steppe meadow was the major characteristic feature of the culturable part of the soil microbial community.

Keywords: Oymyakon; catenal soil series; labile organic carbon; CFU; enzymatic activity; CLPP.

How to cite: Danilova A.A., Danilov P.P., Makarov V.S., Vinokurov A.A. Some biological properties of the Kuidusun depression soils of Oymyakon. *The Journal of Soils and Environment*. 2024. 7(1). e245 (in Russian with English abstract). DOI: [10.31251/pos.v7i1.245](https://doi.org/10.31251/pos.v7i1.245)

ACKNOWLEDGEMENT

The article is written in memory of our teacher Dmitry Dmitrievich Savvinov, a prominent researcher of permafrost soils.

FINANCIAL SUPPORT

The study was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (projects No. 5.3638.2011 and ПФ FSRG-2020-0018).

REFERENCES

- Bronnikova M.A., Gerasimova M.I., Konopliyanikova Yu.V., Gurkova E.A., Chernousenko G.I., Golubtsov V.A., Ephimov O.E. Cryoaridic Soils as a Genetic Type in Soil Classification System of Russia: Geography, Morphology, Diagnostics. *Eurasian Soil Science*. 2022. Vol. 55. No. 3. P. 283–298. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229322030036>.
- Vinokurov A.A. Anthropogenic impact on the soils of pastures of the Oymyakon Highlands in northeastern Yakutia. Dissertation ... Cand. of Biol. Sci. Yakutsk, 2012. 124 p. (in Russian).
- Volkovincer V.I. Steppe cryoarid soils. Novosibirsk: Nauka Publ., 1978. 207 p. (in Russian).
- Gorlenko M.V., Kozhevnikov P.A. Multisubstrate testing of natural microbial communities. Moscow: Maks Press, 2005. 288 p. (in Russian).
- Danilova A.A., Legostaeva Ya.B., Sivtseva N.E., Petrov A.A. A method for assessing the stability of the saprotrophic microbial community of soil using the multisubstrate test method. Patent No. 2678876. 2019. Bull. No. 2. (in Russian).
- Danilova A.A., Petrov A.A. Studies of post mining soils in the Republic of Sakha (Yakutia). *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2022a. Vol. 27. No. 4. P. 547–560. DOI: <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-4-547-560>. (in Russian).
- Danilova A.A., Petrov A.A. Visualization of soil microbiological processes using a light microscope. Part 2. Observing the fungi participation in the formation of new soil organic matter. *The Journal of Soils and Environment*. 2022b. Vol. 5. No. 3. e185. DOI: <https://doi.org/10.31251/pos.v5i3.185>. (in Russian).
- Danilova A.A., Savvinov G.N., Gavril'eva L.D., Danilov P.P., Ksenofontova M.I., Petrov A.A. Short-term exclusion of degraded pasture in the permafrost zone: aspects of soil microbial community. *Arid Ecosystems*. 2017. Vol. 7. No 3. P. 184–190. DOI: <https://doi.org/10.1134/S2079096117030039>.
- Elovskaya E.G. Classification and diagnostics of permafrost soils in Yakutia. Yakutsk: YaF SB AN USSR, 1987. 172 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).
- 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).
- Makarov V.S., Savvinov G.N., Gololobova A.G. Temperature regime of the frozen soils of the Kuidusun depression of the Oymyakon highland. *Regional environmental issues*. 2022. No. 5. P. 71–77. DOI: <https://doi.org/10.24412/1728-323X-2022-5-71-77>. (in Russian).
- Methods of soil microbiology and biochemistry. Moscow: MSU, 1980. 200 p. (in Russian).
- Mishustin E.N. Associations of soil microorganisms. Moscow: Nauka Publ., 1975. 106 p. (in Russian).
- Okoneshnicova M.V., Ivanova A.Z., Desyatkin R.V., Nikolin E.G. Soils of High-Altitude Belts of the Suntar-Khayata Ridge: Morphology, Properties, Classification. *Eurasian Soil Science* 2021. Vol. 54. No. 5. P. 680–688. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229321050148>.
- Skryabin S.Z., Konorovsky A.K. Vegetation and soils of the steppes of the middle reaches of the Indigirka. Botanical materials for Yakutia. Yakutsk: Publishing house YaF SB AN USSR, 1975. P. 38–47. (in Russian).
- Schelchkova M.V., Solomonov N.G., Davydov S.P., Davydova A.I., Fyodorov-Davydov D.G., Boeskorov G.G. Initial data on biological activity of taiga-steppe soils in the lower reaches of the Kolyma River. *Doklady Biological Sciences*. 2017. Vol. 477. No. 1. P. 214–218. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0869565217310255>.
- Banning N.C., Lalor B.M., Cookson W.R., Grigg A.H., Murphy D.V. Analysis of soil microbial community level physiological profiles in native and postmining rehabilitation forest: Which substrates discriminate? *Applied Soil Ecology*. 2012. Vol. 56. P. 27–34. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2012.01.009>.
- Kaneda S., Křišťufek V., Baldrian P., Malý S., Frouz J. Changes in functional response of soil microbial community along chronosequence of spontaneous succession on post mining forest sites evaluated by Biolog and SIR methods. *Forests*. 2019. Vol. 10. No. 11. P. 1005. DOI: <https://doi.org/10.3390/f10111005>.

IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome, 2014, update 2015. 181 p.

*Received 12 January 2024
Accepted 26 February 2024
Published 07 March 2024*

About the authors:

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

Petr P. Danilov – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher in the D.D. Savvinov Research Institute of Applied Ecology of the North, M.K. Ammosov North-Eastern Federal University (Yakutsk, Russia); DanPP@mail.ru

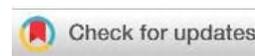
Viktor S. Makarov – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, D.D. Savvinov Research Institute of Applied Ecology of the North, M.K. Ammosov North-Eastern Federal University; Senior Researcher, Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences (Yakutsk, Russia); mvs379@yandex.ru

Andrey A. Vinokurov – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher in the D.D. Savvinov Research Institute of Applied Ecology of the North, M.K. Ammosov North-Eastern Federal University (Yakutsk, Russia); andvin80@mail.ru

The authors read and approved the final manuscript



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



Географо-генетические особенности почвообразования и разнообразие мерзлотных почв Центральной Якутии

© 2024 А. П. Чевычелов , П. И. Собакин , Л. И. Кузнецова 

Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, проспект Ленина, 41, г. Якутск, 677980, Россия.
E-mail: chev.soil@list.ru

Цель данной статьи – выявление географо-генетических особенностей почвообразования в криолитозоне Центральной Якутии и оценка разнообразия всех типов мерзлотных почв данной территории.

Место и время проведения. Почвенно-географические и почвенно-генетические исследования проводили на территории Центральной Якутии в среднем течении р. Лена в пределах различных геоморфологических ярусов Центрально-Якутской равнины в различное время, начиная с 90-х годов XX века. При проведении данных работ использовали общепринятые методы почвенных исследований, такие как сравнительно-географический, профилльно-генетический и сравнительно-аналитический в сочетании с известными методиками аналитических работ. При этом учитывали в сравнительном аспекте все основные результаты почвенных исследований, проведенных ранее на данной территории почвоведомы-мерзлотниками.

Основные результаты. По результатам проведенных исследований необходимо констатировать, что данный регион криолитозоны отличается предельно своеобразными ландшафтно-климатическими условиями почвообразования, при которых формирование криогенных почв происходит в криоаридном климате, преимущественно на рыхлых аллювиальных отложениях различного возраста, под лесной и лугово-степной растительностью и сплошном распространении многолетней мерзлоты. На данной территории криогенные почвообразовательные процессы имеют решающее значение для формирования свойств, состава и режимов данных мерзлотных почв, обуславливая их большое разнообразие и пестроту почвенного покрова Центральной Якутии. Систематический список мерзлотных почв исследуемой территории включает 17 типов и 21 подтип и будет расширяться по мере углубления изучения почвенного покрова этого уникального региона криолитозоны. При этом разнообразие почв здесь сформировано посредством 6 типов зональных и азональных лесных, 5 типов лугово-степных и 6 интразональных типов мерзлотных почв. Предложено более широкое понятие «мерзлотные почвы», в отличие от такового, трактуемого в современной классификации почв России и WRB, суть которого состоит в следующем: вне зависимости от глубины сезонного протаивания все почвы, подстилаемые многолетней мерзлотой, относятся к мерзлотным; в данных почвах в зимний период отмечается смыкание сезонной и многолетней мерзлоты. Эти почвы могут отличаться явно выраженными криоморфными признаками (криоземы, палевые) или не иметь их (подбуры, подзолы, черноземы), для данных почв характерен мерзлотный тип температурного режима.

Заключение. В условиях криолитозоны Центральной Якутии элементарные почвообразовательные процессы протекают на фоне криогенеза, который в общей иерархии факторов-почвообразователей рассматривается на субфакториальном уровне; в этих условиях незначительные вариации данных факторов приводят к изменению направлений и темпов течения почвообразовательных процессов и, в конечном счёте, обуславливают высокую степень разнообразия и контрастности почвенного покрова исследуемой территории.

Ключевые слова: Центрально-Якутская равнина; факторы почвообразования; мерзлотные почвы; состав и свойства почвы; разнообразие почв.

Цитирование: Чевычелов А.П., Собакин П.И., Кузнецова Л.И. Географо-генетические особенности почвообразования и разнообразие мерзлотных почв Центральной Якутии // Почвы и окружающая среда. 2024. Том 7. № 1. e233. DOI: [10.31251/pos.v7i1.233](https://doi.org/10.31251/pos.v7i1.233).

ВВЕДЕНИЕ

Якутскими почвоведомы-мерзлотниками за годы их работы получены новые оригинальные данные по морфологии, генезису и географии мерзлотных почв, которые не получили до сих пор своего объяснения и требуют разработки новых подходов (Еловская, 1987; Коноровский, 1990; Скрыбыкина, Чевычелов, 2003; Чевычелов и др., 2009; Саввинов, 2013; Скрыбыкина, 2017; Чевычелов, Шахматова, 2018; и др.). В связи с этим необходимо отметить то обстоятельство, что при разработке новой субстантивно-генетической классификации почв России (Классификация..., 2004) значительно сузился круг мерзлотных почв или набор почвенных типов, отражающих все разнообразие почв мерзлотной области. Безусловно, что все особенности почвообразования,

формирования состава и свойств мерзлотных почв Центральной Якутии обусловлены спецификой ландшафтно-климатических условий этого уникального региона криолитозоны, где одновременно на одной территории формируются лесные и лугово-степные ландшафты, а частные или **элементарные почвообразовательные процессы (ЭПП)** протекают на фоне сплошного распространения многолетней мерзлоты. В связи с этим целью данной статьи являлось выявление географо-генетических особенностей почвообразования в криолитозоне Центральной Якутии и оценка разнообразия всех типов мерзлотных почв данной территории.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследования являлись 12 разрезов мерзлотных почв Центральной Якутии, включающих 5 типов лесных и 5 типов лугово-степных почв (табл. 1). Центральная Якутия является уникальным регионом криолитозоны, в котором мерзлотные почвы формируются в условиях криоаридного климата, сплошного распространения многолетней мерзлоты, в основном на рыхлых аллювиальных отложениях различного возраста, под лесной и лугово-степной растительностью (Зольников, 1954; Еловская, Коноровский, 1978; Еловская, 1987; Десяткин, 2008; Чевычелов и др., 2009; Саввинов, 2013; и др.).

Таблица 1

Морфологическая характеристика исследуемых типов мерзлотных почв Центральной Якутии

№	№ разреза	Название почв	Морфологическое строение профиля
Мерзлотные лесные почвы			
1	Р. 2БС-18	Подзол иллювиально-гумусово-железистый (Albic Podzols)	O(0-4) – A0A1(4-12) – A2(12-16/18) – Bf(16/18-34/37) – Bh,f(34/37-48) – BCfL (48-75 см)
2	Р. 1БС-18	Солодь (Solodic Planosols Albic)	O(0-4) – A0A2(4-8) – A2(8-24/29) – B1ca(24/29-42/48) – B2ca(42/48-66) – BCca(66-86) – CcaL (86-104 см)
3	Р. 3ЧТ-03	Палево-бурая оподзоленная (Haplic Cambisols Dystric)	A0A1(0-4) – A1A2(4-9) – A2B(9-21) – B(21-53) – BC(53-86) – C(86-144 см)
4	Р. 6Т-05	Палевая осолодевшая (Haplic Cambisols Sodic)	A0(0-2) – A1A2(2-10) – A2(10-22) – B1(22-43) – B2ca(43-56) – BCca(56-102) – Cca(102-133 см)
5	Р. 8БС-18	Палевая серая (Haplic Cambisols Eutric)	O(0-3) – A0A1(3-8) – A1(8-24) – ABca(24-40) – Bca(40-62) – BC(62-100) – C(100-110 см)
6	Р. 5БС-18	Перегноино-карбонатная (Rendzic Eutric)	O(0-5) – A0A1(5-8) – A1(8-26) – ABca(26-37) – Bca(37-72) – BC(72-86) – CL(86-102 см)
Мерзлотные лугово-степные почвы			
7	Р. 2ЧТ-03	Чернозем обыкновенный (Calcic Voronic Chernozems)	Av(0-1) – A(1-24) – AB(24-35) – Bca(35-57) – BCca(57-75) – C(75-150 см)
8	Р. 1Т-07	Чернозем выщелоченный (Voronic Chernozems Pachic)	Av(0-1) – A(1-32) – AB(32-54) – B(54-68) – BCca(68-92) – Cca(92-150 см)
9	Р. 10БС-18	Лугово-черноземная (Endosalic Chernozems)	A(0-17) – ABs(17-28) – Bca,s(28-50) – BCca,s(50-92) – Cs(92-105 см)
10	Р. 3БС-18	Черноземно-луговая (Chernozems Gleyic)	Av(0-3) – A(3-30) – AB(30-54/62) – BC(54/62-80) – CL (80-96 см)
11	Р. 5ЧТ-04	Аллювиальная темно-гумусовая (Umbric Fluvisols Oxyaquic)	Av(0-2) – A(2-5) – ABca(5-17) – Bca(17-52) – C1(52-102) – C2(102-138 см)
12	Р. 7БС-18	Солончак солонцеватый (Puffic Solonchaks Aridic)	Aca,s(0-15/18) – Bca,s(15/18-39) – BCca,s(39-65) – Cs(65-100 см)

Примечание.

В скобках приведены названия почв по WRB (World reference base..., 2006).

При проведении исследований использовали общепринятые почвенные методы: сравнительно-географический, профильно-генетический и сравнительно-аналитический (Роде, 1971; Розанов, 1983). Химический состав, а также свойства почв определяли по стандартным методикам, принятым в почвоведении (Аринушкина, 1970; Воробьева, 1989): pH – потенциометрически на приборе иономере «Мультитест ИПЛ-101»; гумус – по Тюрину; обменные катионы в карбонатных почвах – по Шмуку, в бескарбонатных почвах – по Гедройцу; гранулометрический состав – по Качинскому (Качинский, 1958), CO₂ карбонатов – газоволюметрическим методом (Практикум..., 1980). Генетические горизонты почв обозначены в соответствии с принципами, изложенными в Едином государственном реестре почвенных ресурсов России (Единый государственный реестр..., 2014), а диагностику и

классификацию почв осуществляли в соответствии с положениями, принятыми в диагностике и классификации почв СССР (Классификация..., 1977) и мерзлотных почв Якутии (Еловская, 1987).

Согласно классификации типов воздействия макрорельефа на изменение климата, Центрально-Якутская равнина относится к депрессионным ороклиматогенным комплексам (Оленев, 1987). Депрессионное воздействие макрорельефа на климат проявляется во влиянии обширных понижений, расположенных среди больших равнин. В пределах Центрально-Якутской депрессии с передвижением от центра днища вверх по склонам бортов прилегающих водоразделов уменьшаются испаряемость (E), сумма активных температур ($\Sigma t > 10^\circ\text{C}$) и коэффициент континентальности (K_k), в то же время увеличиваются среднегодовая температура воздуха (t_r), среднегодовое количество осадков и коэффициент увлажнения. Причем средние изменения данных показателей на 100 м подъёма высоты составляют для t_r – (+0,7°C), Q_r – (+27 мм), E – (-30 мм), $\Sigma t > 10^\circ\text{C}$ – (-85°C), K_k – (-15), K_y – (+0,06) (Скрыбыкина, Чевычелов, 2003).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Своеобразие состава и строения почвенно-растительного покрова Центрально-Якутской равнины обусловлено влиянием котловинно-депрессионной зональности в условиях сплошного распространения многолетней мерзлоты (рис. 1). При этом в пределах исследованной почвенной катены наблюдается закономерная смена (сверху вниз) типов почвообразования от таёжного к дерново-лесному (лесостепному) и дерновому (лугово-степному) (рис. 2).

В аспекте зональности на территории Центральной Якутии выделяются три почвенные зоны с соответствующими типами зональных почв (Коноровский, 1979):

- таёжная зона мерзлотно-таёжных типичных и мерзлотных дерново-карбонатных (остаточно-карбонатных) почв (от 250–300 м);
- таёжно-алаская зона мерзлотных таёжных палевых осолоделых и мерзлотных черноземно-луговых почв (от 140 до 250–270 м);
- степная зона мерзлотных черноземов низких надпойменных террас рек (100–140 м).

При этом по современной терминологии мерзлотно-таёжные почвы, формирующиеся в таёжной зоне, определяются как мерзлотные палево-бурые (Еловская, 1987).



Рисунок 1. Комплекс надпойменных террас с коренным берегом в долине среднего течения р. Лена в пределах Центрально-Якутской равнины.

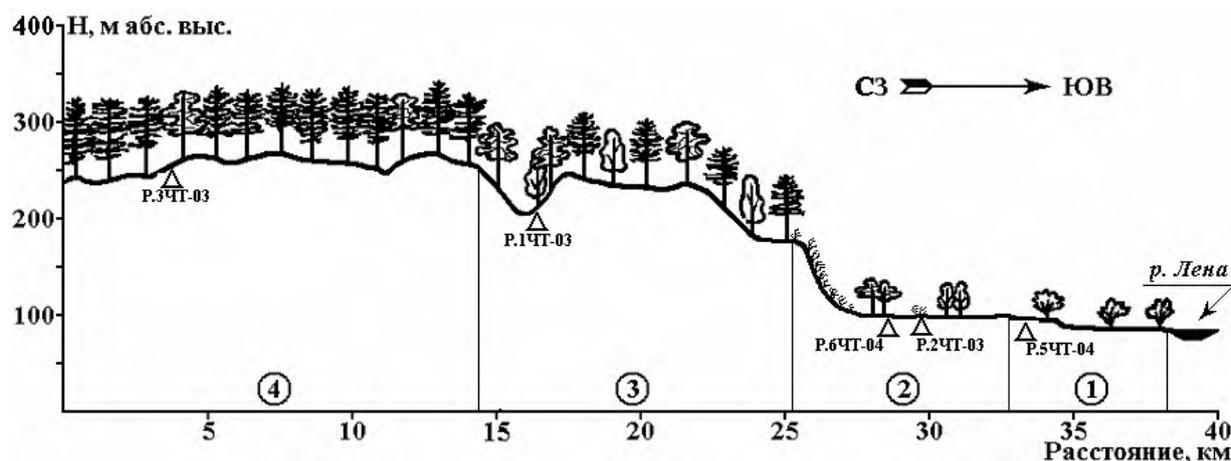


Рисунок 2. Состав и строение почвенно-растительной катены Центрально-Якутской депрессии, профиль «оз. Большая Чабыда – пос. Хатассы» (Чевычелов и др., 2009).

Пояснения к рис. 2. Лугостепь в долине Средней Лены и по склону коренного берега: 1 – нормальные разнотравно-злаковые и влажные осоково-хвощевые луга на аллювиальных и лугово-болотных почвах; 2 – остепненные луга и степные участки на черноземовидных почвах и черноземах мерзлотных в сочетании с островками сосновых и березовых лесов на палевых типичных и палевых серых почвах. Лесостепь на эрозионных поверхностях среднего уровня древней аллювиальной равнины: 3 – смешанные разреженные березово-сосново-лиственничные кустарничково-разнотравные и разнотравно-кустарничковые леса на палевых осолоделых почвах и солодах мерзлотных; аласные луга – на аласных лугово-степных почвах. Тайга на пенеппене верхнего уровня древней аллювиальной равнины: 4 – сосново-лиственничные мохово-кустарничковые леса на палево-бурых типичных и оподзоленных почвах. Термин «лугостепь» предложен В.А. Шелудяковой с соавторами (1954) для обозначения лугово-степной растительности Средней Лены; аласные лугово-степные почвы определены и изучены Р.В. Десяткиным (2008); Δ – места заложения почвенных разрезов в катене.

В настоящее время отмечают два основных подхода к диагностике мерзлотных почв (табл. 2). Первый подход разработан и осуществлялся в работах известных почвоведов-мерзлотников: О.В. Макеева (1985), Л.Г. Еловской (1987), А.К. Коноровского (1990), Д.Д. Саввинова (2013) и других российских почвоведов. Второй подход разработан и реализован в новой классификации почв России (Классификация..., 2004) и WRB (World reference base..., 2006).

Таблица 2

Основные подходы к диагностике мерзлотных почв

По: Макеев (1985), Еловская (1987), Коноровский (1990), Саввинов (2013)	По: Классификация... (2004) и WRB (World reference base..., 2006)
1. Вне зависимости от глубины сезонного протаивания все почвы, подстилаемые многолетней мерзлотой, относятся к мерзлотным. В данных почвах в зимний период отмечается смыкание сезонной и многолетней мерзлоты.	1. Глубина сезонного протаивания в криоземах – 0,5–1,0 м (Классификация..., 2004), в криосолях – до 1 м (Таргульян, Герасимова, 2007).
2. Эти почвы могут отличаться явно выраженными криоморфными признаками (криоземы, палевые) или не иметь их (подбуры, подзолы, черноземы).	2. Для этих почв характерны криоморфные признаки: многолетние устойчивые сегрегации льда, криотурбации, макро- и микроструктуры, сформированные криогенными процессами (плитчатые и блоковые макроструктуры).
3. Для данных почв характерен мерзлотный тип температурного режима (Димо, Розов, 1974).	

Основными типами изучаемых нами мерзлотных лесных почв Центральной Якутии являлись: мерзлотные подзолы, мерзлотные солоды, мерзлотные палево-бурые, мерзлотные палевые, мерзлотные перегнойно-карбонатные почвы, распространенные в пределах различных геоморфологических ярусов Центрально-Якутской равнины. Основными типами мерзлотных лугово-степных почв данной территории Якутии являлись мерзлотные черноземы, мерзлотные лугово-черноземные и мерзлотные черноземно-луговые, формирующиеся на низких надпойменных террасах (I и II) Средней Лены на наиболее низком (0–140 м) высотном уровне Центрально-Якутской равнины.

Среди интразональных типов почв нами были исследованы также мерзлотные аллювиальные и мерзлотные засоленные почвы, то есть мерзлотные солончаки (табл. 1).

Как следует из содержания основных работ по рассматриваемой тематике (Еловская, Коноровский, 1978; Еловская, 1987; Скрыбыкина, 2017; Чевычелов и др., 2009; Чевычелов и др., 2022; 2023), систематический список мерзлотных почв Центральной Якутии в настоящее время включает 17 типов и 21 подтип почв (табл. 3).

Таблица 3

Систематический список мерзлотных почв Центральной Якутии

№ п/п	Тип почв	№ п/п	Подтип почв
Лесные			
1.	Подзолы	1.	Иллювиально-железистые
2.	Солоди	2.	Иллювиально-гумусовые
3.	Палево-бурые	3.	Без разделения
4.	Палевые	4.	Типичные
		5.	Оподзоленные
		6.	Типичные
		7.	Осолоделые
		8.	Выщелоченные
		9.	Серые
5.	Дерново-карбонатные	-	Турбированные
6.	Перегноино-карбонатные	-	Без разделения
		-	Без разделения
Лугово-степные			
7.	Чернозёмы	10.	Обыкновенные
8.	Лугово-чернозёмные	11.	Выщелоченные
9.	Чернозёмно-луговые	12.	Типичные
10.	Дерново-луговые	13.	Солонцеватые
11.	Лугово-болотные	14.	Типичные
		15.	Глееватые
		16.	Типичные
		17.	Глееватые
		-	Без разделения
Интразональные			
12.	Аллювиальные слоистые	-	Без разделения
13.	Аллювиальные темногумусовые	18.	Типичные
14.	Болотные низинные	19.	Глееватые
15.	Сапропели	-	Без разделения
16.	Солончаки	20.	Типичные
17.	Солонцы	21.	Торфянистые
		-	Без разделения
		-	Без разделения

Исследуемые почвы формируются в условиях сплошной криолитозоны Центральной Якутии с максимальной мощностью многолетнемерзлых пород 350–400 м. Однако в связи с легким гранулометрическим составом их почвообразующих пород, представленных рыхлыми аллювиальными отложениями, криоморфные признаки здесь выражены слабо. Это отражается в отсутствии или слабом проявлении в них морфологических признаков мерзлотного массообмена и связанного с криотурбациями полигонально-трещиноватого микрорельефа поверхности данных почв, а также льдистой многолетней мерзлоты. Глубина протаивания в среднем составляет 1,5–2,0 м, при этом сезонно-талый слой, как правило, подстилается горизонтом «сухой» многолетней мерзлоты. Согласно второму подходу исследуемые почвы не являются мерзлотными и, как следствие, криогенные процессы не определяют их генезис. Но тогда возникает вопрос: «Каким образом и посредством каких почвенных процессов формируются сильнодифференцированные по свойствам и составу почвы (табл. 4) с мощными элювиальными горизонтами А2 в условиях засушливого климата Центральной Якутии?» (Чевычелов и др., 2022). Морфология, состав и свойства таких подзолов были изучены, в частности, В.П. Скрыбыкиной (2017).

Морфологические характеристики и физико-химические свойства исследуемых мерзлотных почв значительно различаются как на типовом, так и на подтиповом уровнях (рис. 3, 4, табл. 4, 5). При этом в составе 6 типов мерзлотных лесных почв данного региона, 2 типа, то есть дерново-

карбонатные и перегнойно-карбонатные являются азональными и формируются на элюво-делювии осадочных карбонатных пород (доломитов и известняков).

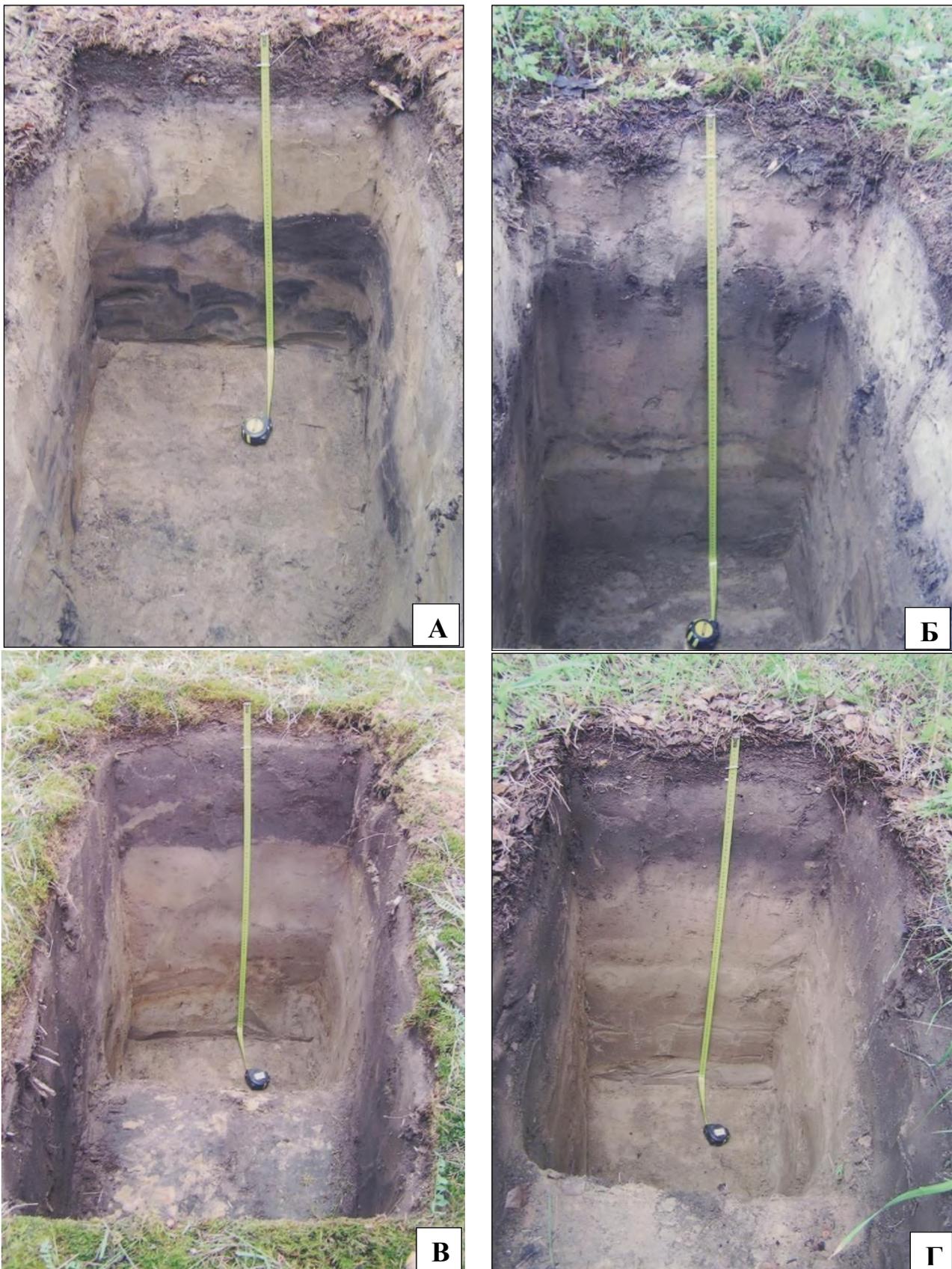


Рисунок 3. Мерзлотные лесные почвы Центральной Якутии: А – подзол иллювиально-гумусовый, разрез 2БС-18; Б – солодь, разрез 1БС-18; В – перегнойно-карбонатная, разрез 5БС-18; Г – палевая серая, разрез 8БС-18.

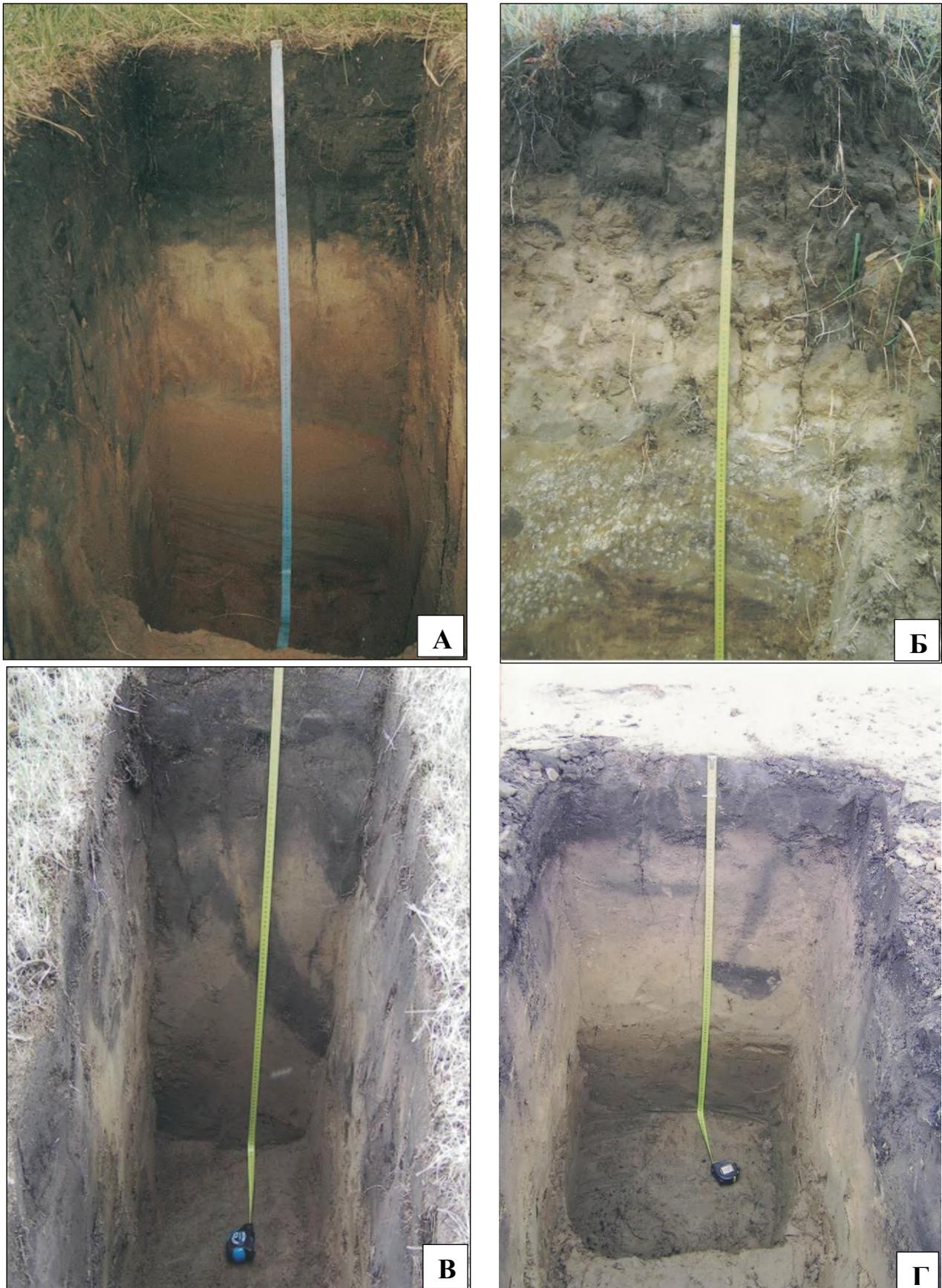


Рисунок 4. Мерзлотные лугово-степные почвы Центральной Якутии: **А** – чернозём обыкновенный, разрез 2ЧТ-03; **Б** – чернозём выщелоченный, разрез 7БС-20; **В** – чернозёмно-луговая, разрез 3БС-18; **Г** – солончак солонцеватый, разрез 7БС-18.

Реакция среды подзола (разрез 2БС-18) оценивается, в основном, как слабокислая и кислая в гор. А2. Несмотря на морфологически выраженную оподзоленность данной почвы (рис. 3А), в её почвенно-поглощающем комплексе (ППК) абсолютно преобладают щелочноземельные катионы Ca^{2+} и Mg^{2+} , а на долю обменного H^+ в гор. А2 максимально приходится всего 34% от суммы обменных оснований. Это указывает на то, что в криоаридных условиях Центральной Якутии элювиальный альфегумусовый процесс (Розанов, 1983) проявляется в мягкой форме, на что мы уже указывали ранее (Чевычелов и др., 2022). Распределение гумуса в минеральной толще данной почвы осуществляется по аккумулятивно-элювиально-иллювиальному типу, а фракций ила и физической глины – по элювиально-иллювиальному. Гранулометрический состав этой почвы – песчано-супесчаный (табл. 4).

В верхней части профиля солоди (разрез 1БС-18), также как и в подзоле, выделяются органогенные горизонты О и А0А2 с высоким содержанием почвенного органического вещества; однако в отличие от подзола гумус здесь распределен в минеральной толще по аккумулятивному типу. Реакция среды в верхних горизонтах в основном слабокислая, а в нижних – щелочная. Профиль этой почвы резко дифференцирован по содержанию частиц ила и физической глины по элювиально-иллювиальному типу; гранулометрический состав – преимущественно среднесуглинистый. В ППК данной почвы абсолютно преобладают обменные катионы Ca^{2+} и Mg^{2+} , а содержание поглощенного Na^+ совсем незначительное. Эта почва вскипает от 10% HCl с глубины 29 см, так как содержит свободные карбонаты кальция и магния, на что указывают значения CO_2 карбонатов (табл. 4).

Реакция среды палево-бурой оподзоленной почвы (разрез 3ЧТ-03), в отличие от подзола, в основном кислая; внутрипрофильное распределение гумуса происходит по аккумулятивному типу, а фракций ила и физической глины носит резко дифференцированный элювиально-иллювиальный характер. Гранулометрический состав изменяется от песчаного в горизонтах А1А2 и С, до супесчаного в ВС, легко- и среднесуглинистого, соответственно, в горизонтах А2В и В (табл. 4). В данной почве, как и в первых двух, в ППК преобладают поглощенные основания Ca^{2+} и Mg^{2+} , но вместе с тем, здесь также присутствуют обменные катионы Na^+ и H^+ . Это обстоятельство, отмеченное нами ранее (Чевычелов и др., 2009), является региональной особенностью криоаридного мерзлотного почвообразования, когда в условиях периодически промывного режима мерзлотных лесных почв Центральной Якутии не происходит полного выноса катиона Na^+ из состава их ППК.

Состав и свойства палевой осолоделой почвы (разрез 6Т-05) в значительной степени схожи с таковыми солоди (разрез 1БС-18). Здесь также отмечается двухчленный по реакции среды профиль: верхний – слабокисло-нейтральный и нижний – щелочной. Внутрипрофильное распределение гумуса носит аккумулятивно-элювиально-иллювиальный, а ила и глины – резко дифференцированный элювиально-иллювиальный характер. В составе ППК данной почвы при общем господстве катионов Ca^{2+} и Mg^{2+} отмечается более весомое присутствие обменного Na^+ . Согласно известным критериям (Еловская, 1987) эта почва, в целом, может быть определена как слабосолонцеватая, а в горизонте А2 – среднесолонцеватая. Гранулометрический состав здесь характеризуется, в общем, как супесчано-легкосуглинистый (Практикум..., 1980).

Если первые четыре мерзлотные лесные почвы изучаемого региона формируются под влиянием, в основном, элювиальных элементарных почвенных процессов (ЭПП), таких как оподзоливание и осолодение, то две последние – преимущественно под влиянием гумусонакопления, что особенно выражено в морфологии (рис. 3Г) и свойствах палевой серой почвы (разрез 8БС-18). Здесь реакция почвы в верхней части профиля характеризуется как слабокислая, а в нижней – щелочная; внутрипрофильное распределение гумуса, а также частиц ила и глины происходит, преимущественно, по аккумулятивному типу. В средней части профиля данной почвы под влиянием карбонатно-иллювиального процесса (Розанов, 1983) обособляются подвижные карбонаты кальция и магния, а её гранулометрический состав определяется, главным образом, как легко- и среднесуглинистый (табл. 4).

Реакция среды мерзлотной перегнойно-карбонатной почвы характеризуется, в основном, как нейтрально-щелочная и даже сильнощелочная, внутрипрофильное распределение гумуса, частиц глины и ила – как преимущественно аккумулятивное. В ППК данной почвы абсолютно господствуют катионы Ca^{2+} и Mg^{2+} при незначительном участии Na^+ , в средней части профиля присутствуют свободные карбонаты Са и Mg, образованные посредством карбонатно-иллювиального процесса (табл. 4).

Таблица 4

Физико-химические свойства мерзлотных лесных почв Центральной Якутии

Горизонт	Глубина, см	pH _{H2O}	Гумус, % (ППП)	Обменные катионы, ммоль(экв)/100 г почвы				Фракции, %		CO ₂ карбонатов, %
				Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	H ⁺	<0,001 мм	<0,01 мм	
Подзол иллювиально-гумусово-железистый, разрез 2БС-18										
О	0-4	5,7	88,7*	-	-	-	-	-	-	-
A0A1	4-12	5,1	46,4*	23,1	10,9	-	2,8	-	-	-
A2	12-18	4,7	3,4	3,8	1,2	-	2,6	4,8	12,5	-
Bf	20-30	5,6	0,8	2,2	1,7	-	0,2	3,2	5,3	-
Bh,f	38-48	6,0	1,6	8,7	1,7	-	0,7	5,7	19,3	-
BCf	48-58	6,3	0,3	3,5	1,6	-	0,2	4,0	7,7	-
Солодь, разрез 1БС-18										
О	0-4	5,6	86,3*	47,7	12,2	-	-	-	-	Н.о.
A0A2	4-8	4,9	33,2*	45,0	11,8	0,3	-	-	-	-/-
A2	14-24	5,2	4,7	15,3	7,2	0,2	-	11,5	35,6	-/-
B1ca	28-38	8,5	4,4	19,3	6,4	0,7	-	25,7	47,9	5,1
B2ca	44-54	8,9	2,9	13,3	7,1	0,6	-	14,7	34,3	4,4
BCca	70-80	8,7	1,6	10,2	6,1	1,5	-	16,9	33,0	4,5
Cca	90-100	8,8	0,8	12,2	5,1	-	-	18,0	40,0	4,4
Палево-бурая оподзоленная, разрез 3ЧТ-03										
A0A1	0-4	5,0	40,6*	36,2	14,3	2,5	Н.о.	-	-	-
A1A2	4-9	4,8	6,2	5,0	3,0	0,9	0,8	10,7	8,5	-
A2B	10-20	4,8	1,3	1,9	1,6	0,4	1,1	8,7	24,2	-
B	30-40	4,1	0,7	5,7	3,0	0,6	1,0	18,5	36,0	-
BC	60-70	5,0	0,5	2,1	1,5	0,3	0,1	4,6	17,6	-
C	120-130	6,4	0,1	2,1	1,2	0,3	0,1	3,3	5,0	-
Палевая осолодевшая, разрез 6Т-05										
A1A2	2-10	5,9	6,2	14,2	5,0	1,5	-	7,7	15,7	Н.о.
A2	10-22	6,0	0,4	6,3	1,6	1,3	-	7,5	14,8	-/-
B1	30-40	6,1	0,6	11,4	7,0	1,3	-	22,6	30,8	-/-
B2ca	45-55	6,3	0,6	9,5	5,7	1,3	-	18,5	26,2	4,6
BCca	70-80	8,8	0,5	25,2	11,4	1,7	-	17,8	25,6	4,6
Cca	110-120	8,9	-	-	-	-	-	-	-	2,4
Палевая серая, разрез 8БС-18										
A0A1	3-8	6,1	51,6*	52,4	22,4	-	-	-	-	Н.о.
A1	10-20	5,9	13,9	15,8	7,9	-	-	11,7	25,5	-/-
ABca	25-35	8,9	1,1	11,2	8,1	-	-	18,0	40,0	4,3
Bca	45-55	9,0	0,5	9,1	6,1	-	-	16,3	34,7	4,2
BC	75-85	8,6	0,3	11,4	8,1	-	-	13,3	26,4	Н.о.
C	100-110	9,2	0,2	4,0	1,7	-	-	3,3	6,4	-/-
Перегноино-карбонатная, разрез 5БС-18										
О	0-5	6,0	-	68,2	39,6	-	-	-	-	-
A0A1	5-8	6,4	46,8*	60,0	34,1	-	-	-	-	Н.о.
A1	10-20	8,0	4,6	15,7	13,6	1,1	-	8,5	20,7	-/-
ABca	26-36	8,6	3,8	12,3	11,3	1,0	-	10,5	22,4	2,3
Bca	50-60	9,1	0,5	9,1	3,0	0,7	-	12,8	24,6	5,3
BC	75-85	8,8	0,4	7,1	3,0	0,4	-	8,2	14,9	-/-
Cca	90-100	9,1	0,1	5,0	2,0	0,1	-	4,6	5,6	2,5

Примечание.

Здесь и далее: * – приведено значение потери при прокаливании, н.о. – не обнаружено, прочерк – не определено.

Морфологические (см. рис. 3, 4) и физико-химические свойства мерзлотных лугово-степных почв (табл. 5) значительно отличаются от таковых лесных почв Центральной Якутии, которые формируются, в основном, под влиянием дернового ЭПП в сочетании с процессами выщелачивания, засоления, осолонцевания и карбонатно-иллювиального. Так, реакция среды чернозёма обыкновенного (разрез 2ЧТ-03) характеризуется как нейтрально-слабощелочная. В ППК данной почвы абсолютно преобладают катионы Ca²⁺ и Mg²⁺ при значительном участии обменного Na⁺, поэтому она определяется как слабосолонцеватая, а в горизонте АВ – даже как среднесолонцеватая.

Согласно критериям (Еловская, 1987), эта почва не засолена, лишь в горизонте Вса наблюдается относительное накопление бикарбонатов Са и Mg. Изучаемая почва формируется на легких песчаных аллювиальных отложениях и характеризуется супесчано-легкосуглинистым гранулометрическим составом, при этом уменьшение мелкодисперсных частиц ила и глины в верхней части горизонта А связано с проявлением процесса дефляции (Чевычелов и др., 2009). Максимальное количество свободных карбонатов здесь, судя по величине CO₂ карбонатов, отмечается в гор. Вса (табл. 5).

Таблица 5

Физико-химические свойства мерзлотных лугово-степных почв Центральной Якутии

Горизонт	Глубина, см	рН _{H2O}	Гумус, % (ППП)	Обменные катионы, ммоль(экв)/100 г почвы			Фракции, %		Сумма солей, %	CO ₂ карбонатов, %
				Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	<0,001 мм	<0,01 мм		
Чернозём обыкновенный, разрез 2ЧТ-03										
A	1-11	6,3	5,4	15,4	2,4	1,8	6,6	14,4	0,077	Н.о.
A	12-22	6,9	4,4	20,0	2,9	1,6	10,7	21,7	0,088	-/-
AB	25-35	7,5	2,9	18,0	5,3	3,0	10,3	29,5	0,120	-/-
Вса	40-50	7,8	1,4	18,7	11,1	2,3	11,5	28,2	0,874	3,2
BCca	60-70	8,2	0,6	8,3	6,3	0,7	6,6	14,4	0,160	2,8
C	90-100	7,5	0,1	3,3	2,6	0,3	3,5	4,5	0,028	Н.о.
Чернозём выщелоченный, разрез 1Т-07										
Av	0-1	6,9	5,9	22,7	7,7	1,8	7,4	12,0	-	Н.о.
A	2-12	6,6	4,3	18,5	7,2	1,2	11,3	19,3	-	-/-
A	20-30	6,7	2,1	19,6	9,3	1,1	13,0	23,0	-	-/-
AB	40-50	7,0	1,9	17,5	10,0	1,3	14,6	24,3	-	-/-
B	55-65	7,5	1,7	15,1	10,2	1,3	15,3	23,9	-	-/-
BCca	70-80	8,1	1,6	13,9	10,8	1,2	16,0	23,5	-	1,4
Cca	120-130	8,1	-	-	-	-	15,0	25,4	-	2,7
Лугово-чернозёмная, разрез 10БС-18										
A	5-15	7,5	7,4	22,5	8,2	0,3	8,7	28,1	0,107	Н.о.
ABs	17-27	8,7	5,2	12,3	10,3	0,2	21,9	44,8	0,438	-/-
Вса,s	35-45	9,1	1,5	11,1	8,1	0,1	20,5	41,0	0,610	5,6
BCca,s	70-80	9,7	0,6	7,1	6,0	0,1	10,7	22,9	0,366	3,2
Cs	92-102	9,4	0,4	6,0	5,0	0,1	10,4	21,5	0,285	Н.о.
Чернозёмно-луговая, разрез 3БС-18										
Av	0-3	8,0	29,0*	58,1	33,2	-	7,9	17,0	-	Н.о.
A	10-20	8,1	9,2	21,5	17,2	-	10,2	24,8	-	-/-
AB	40-50	8,5	3,7	9,5	10,5	-	13,7	29,1	-	-/-
BC	60-70	8,6	1,2	7,9	9,9	-	17,5	37,2	-	-/-
C	80-90	8,4	1,9	7,3	9,4	-	17,3	36,1	-	-/-
Аллювиальная темногумусовая, разрез 5ЧТ-04										
A	2-5	8,3	6,7	29,7	14,3	3,8	6,6	16,4	-	-
ABca	5-15	8,9	1,7	25,2	10,5	4,6	8,7	19,7	-	-
BCca	30-40	8,2	1,5	35,2	9,6	2,8	9,9	22,9	-	-
C1	70-80	8,0	1,4	14,3	3,3	1,7	6,2	16,4	-	-
C2	120-130	7,9	-	7,5	1,9	1,1	3,8	6,6	-	-
Солончак солонцеватый, разрез 7БС-18										
Aca,s	0-5	9,3	8,5	7,2	21,6	31,2	19,7	38,7	4,042	2,7
Aca,s	5-15	9,3	5,9	10,3	11,4	16,8	23,7	44,4	2,440	3,7
Вса,s	23-33	9,2	3,4	8,1	7,1	1,2	18,1	41,3	1,527	6,6
BCca,s	45-55	9,5	0,6	3,0	2,8	0,8	7,0	13,3	0,562	3,2
Cs	80-90	9,1	0,6	5,0	4,9	0,7	7,2	12,8	0,593	Н.о.

При всём сходстве свойств изучаемых подтипов мерзлотных чернозёмов, в почве разреза 1Т-07 наблюдаются существенные отличия, связанные с проявлением процесса выщелачивания. Так, гумусовый профиль чернозёма выщелоченного более мощный, степень солонцеватости – слабая, горизонт В свободен от карбонатов и они выщелочены на большую глубину (табл. 5).

Мерзлотные чернозёмовидные почвы (разрез 10БС-18 и разрез 3БС-18) по свойствам и составу значительно отличаются от зональных мерзлотных чернозёмов, в особенности от чернозёма обыкновенного (разрез 2ЧТ-03), который является исключительно автоморфной почвой,

развивающейся только в условиях атмосферного увлажнения. Черноземовидные почвы, расположенные ниже по рельефу и сопряженные с чернозёмами, получают в весеннее время также дополнительную влагу в виде надмерзлотной верховодки. Поэтому мерзлотная лугово-черноземная почва (разрез 10БС-18) характеризуется в основном щелочной и сильнощелочной реакцией среды, большим содержанием гумуса в горизонтах А и АВ, отчётливой средней степени засоления при отсутствии солонцеватости всего почвенного профиля, максимальным количеством свободных карбонатов в гор. Vca, обусловленным влиянием карбонатно-иллювиального процесса (табл. 5).

Мерзлотная чернозёмно-луговая почва (разрез 3БС-18) сформирована в проточном понижении, поэтому она не засоленная и не солонцеватая, а также на всю глубину профиля отмыта от свободных карбонатов. Данная почва характеризуется аккумулятивным внутрипрофильным распределением гумуса с его максимальным количеством в горизонте А, супесчано-легко- и среднесуглинистым гранулометрическим составом (табл. 5).

Мерзлотная аллювиальная темногумусовая почва (разрез 5ЧТ-04) характеризуется, в основном, щелочной реакцией среды, аккумулятивным внутрипрофильным распределением гумуса, преобладанием в ППК щелочноземельных катионов Ca^{2+} и Mg^{2+} , при существенном присутствии поглощенного Na^+ ; поэтому она определяется как слабо- и среднесолонцеватая, а по гранулометрическому составу – как песчано-супесчаная (табл. 5).

Мерзлотная засоленная почва (разрез 7БС-18), диагностируемая как солончак солонцеватый, формируется в плоском непроточном понижении при отсутствии какой-либо растительности на её поверхности, то есть в условиях криогенно-выпотного водного режима, максимально способствующему внутрипочвенному и поверхностному накоплению воднорастворимых солей. Поэтому данная почва отличается сильнощелочной реакцией среды, максимальной степенью засоленности и солонцеватости (табл. 5). Гумусовый профиль имеет аккумулятивный характер, количество гумуса в горизонте Aca,s – среднее и высокое. Гранулометрический состав характеризуется в поверхностной части профиля как средне- и тяжелосуглинистый, а в нижней – как супесчаный. Эта почва вскипает с поверхности, а максимальное содержание свободных карбонатов отмечается в горизонте Vca,s . Согласно указанным выше критериям засоленности и солонцеватости, данная почва также может быть диагностирована как хлоридно-натриевый солончак-солонец высокосолонцеватый (гор. Aca,s), глубже как солончак слабосолонцеватый (гор. Vca,s) и ещё глубже (гор. VСа,s и гор. Cs) как средnezасоленная слабо- и среднесолонцеватая с хлоридно-натриевым типом засоления (Чевычелов и др., 2022, с. 60).

Среди 5 типов мерзлотных лугово-степных почв на данной территории выделяются мерзлотные чернозёмы, которые являются уникальными почвами, формирующимися в мерзлотной области на северной границе ареала чернозёмных почв России. Кроме чернозёмов в данной группе почв выделяются мерзлотные чернозёмовидные почвы – мерзлотные лугово-чернозёмные и мерзлотные чернозёмно-луговые, а также мерзлотные дерново-луговые и мерзлотные лугово-болотные почвы.

В составе интразональных почв исследуемой территории выделяются 5 типов мерзлотных почв, которые представлены аллювиальными, болотными и засоленными почвами (табл. 3).

О генетической сущности мерзлотных подзолов. Нами выдвигается гипотеза формирования полнопрофильных подзолов в ландшафтно-климатических условиях Центральной Якутии за счет кратковременного поздневесеннего надмерзлотного переувлажнения оттаявшего слоя, сопровождающегося процессами оглеения и кислотного гидролиза, с последующим выносом тонкодисперсных продуктов почвообразования в нижележащие горизонты почвенного профиля (Скрыбыкина, 2017). При этом главенствующая роль в формировании подзолистого процесса в данных условиях отводится местоположению почв в рельефе, дренирующим способностям почвообразующих пород и наличию многолетней мерзлоты. В целом, данный мерзлотный ЭПП может быть определен как *криогенное альфегумусовое оподзоливание*.

О генетической сущности мерзлотных солодей. Аналогичная гипотеза может быть предложена и для объяснения генезиса солодей, формирующихся под лесной растительностью, но с определенными дополнениями. Солоди, в отличие от подзолов, развиваются в трансаккумулятивных фациях ландшафтов, по западинам рельефа и характеризуются затрудненным внутрипочвенным дренажом. При этом в почвенных растворах накапливаются катионы Na^+ и Mg^{2+} , обуславливающие солонцеватость почвенно-поглощающего комплекса почв и щелочную реакцию среды. В этом случае разрушение алюмосиликатной части почв и вынос тонкодисперсных продуктов в нижележащие иллювиальные горизонты происходит под влиянием щелочного гидролиза; относительное накопление SiO_2 в иллювиальном горизонте A_2 отмечается в форме аморфной кремнекислоты, а не в виде остаточного кварца, как это наблюдается в подзолах. Но, как и в подзолах, этот основной

мерзлотный ЭПП, способствующий формированию солодей в ландшафтно-климатических условиях Центральной Якутии, можно определить, как *криогенное осолодение*.

О генетической сущности мерзлотных черноземов. Мерзлотные черноземы Якутии являются автоморфным типом почв и формируются по мезоповышениям надпойменных террас и склонам южных экспозиций коренного берега, под степными ассоциациями в долине среднего течения р. Лена в пределах нижнего высотного уровня (100–140 м) Центрально-Якутской равнины в условиях котловинно-депрессивной зональности почвенно-растительного покрова (Чевычелов и др., 2009). В зависимости от положения в рельефе мерзлотные черноземы подразделяются на два подтипа – черноземы обыкновенные и черноземы выщелоченные.

ВЫВОДЫ

На основе представленных в статье материалов можно сделать следующие основные выводы:

1. Центральная Якутия является уникальным регионом криолитозоны, в котором мерзлотные почвы формируются в условиях криоаридного климата, преимущественно на рыхлых аллювиальных отложениях различных геоморфологических ярусов Центрально-Якутской равнины, под лесной и лугово-степной растительностью.

2. Криогенные почвообразовательные процессы имеют решающее значение для формирования свойств, состава и режимов данных мерзлотных почв, обуславливая их высокое разнообразие и пестроту почвенного покрова Центральной Якутии.

3. Систематический список мерзлотных почв исследуемой территории включает 17 типов и 21 подтип почв и будет расширяться по мере углубления изучения почвенного покрова этого уникального региона криолитозоны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В условиях криоаридного климата Центральной Якутии, когда многолетняя мерзлота согласно О.В. Макееву (1985) является субфактором почвообразования, незначительные изменения факторов-почвообразователей приводят к существенной смене направлений и темпов течения почвообразовательных процессов. Это обстоятельство приводит к значительному разнообразию почв и пестроте почвенного покрова данного региона криолитозоны.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ 0297-2021-0027, НИР ЕГИСУ ААААА-А21-121012190033-5).

ЛИТЕРАТУРА

- Аринушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. Москва: Изд-во Моск. ун-та, 1970. 487 с.
- Воробьева Л.А. Химический анализ почв. Москва: Изд-во Моск. ун-та, 1989. 272 с.
- Десяткин Р.В. Почвообразование в термокарстовых котловинах–аласах криолитозоны. Новосибирск: Наука, 2008. 324 с.
- Димо В.Н., Розов Н.Н. Термические критерии как основа фациально-провинциального разделения почв // Почвоведение. 1974. № 5. С. 12–22.
- Единый государственный реестр почвенных ресурсов России. Версия 1.0. Коллективная монография. Москва: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева Россельхозакадемии, 2014. 768 с.
- Еловская Л.Г., Коноровский А.К. Районирование и мелиорация мерзлотных почв Якутии. Новосибирск: Наука, 1978. 176 с.
- Еловская Л.Г. Классификация и диагностика мерзлотных почв Якутии. Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1987. 172 с.
- Зольников В.Г. Почвы восточной половины Центральной Якутии и их использование // Материалы о природных условиях и сельском хозяйстве Центральной Якутии. Москва: Изд-во АН СССР, 1954. С. 55–221.
- Качинский Н.А. Механический и микроагрегатный состав почвы и методы его изучения. Москва: АН СССР, 1958. 190 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.
- 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.

- Коноровский А.К. О почвенных зонах Центральной Якутии // Почвы зоны БАМ. Новосибирск: Наука, 1979. С. 176–184.
- Коноровский А.К. Зональность и мерзлотность почв Якутии. Якутск, 1990. 43 с.
- Макеев О.В. Почвенный криогенез. Пушкино, 1985. 40 с.
- Оленев А.М. Воздействие макрорельефа на климат и ландшафтные комплексы. Свердловск, 1987. 88 с.
- Практикум по почвоведению / Под ред. И.С. Кауричева. Москва: Колос, 1980. 272 с.
- Роде А.А. Система методов исследования в почвоведении. Новосибирск: Наука, 1971. 92 с.
- Розанов Б.Г. Морфология почв. Москва: Изд-во Моск. ун-та, 1983. 320 с.
- Саввинов Д.Д. Физика мерзлотных почв: Избранные труды. Новосибирск: Наука, 2013. 504 с.
- Скрыбыкина В.П., Чевычелов А.П. Тренды климатических показателей долинно-котловинной почвенной зональности Центральной и Южной Якутии // Вестник Томского государственного университета. 2003. № 3. С. 294–296.
- Скрыбыкина В.П. Подзолы Центральной Якутии // Наука и образование. 2017. № 2. С. 83–90.
- Таргульян В.О., Герасимова М.И. Мировая коррелятивная база почвенных ресурсов: основа для международной классификации и корреляции почв. Москва: Товарищество научных изданий КМК, 2007. 278 с.
- Чевычелов А.П., Скрыбыкина В.П., Васильева Т.И. Географо-генетические особенности формирования свойств и состава мерзлотных почв Центральной Якутии // Почвоведение. 2009. № 6. С. 648–657.
- Чевычелов А.П., Шахматова Е.Ю. Постпирогенные полициклические почвы в лесах Якутии и Забайкалья // Почвоведение. 2018. № 2. С. 243–252. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0032180X18020120>.
- Чевычелов А.П., Горохов А.Н., Николаева О.А., Коробкова Т.С., Сабарайкина С.М. Почвенно-растительный покров Якутского ботанического сада. Новосибирск: СО РАН, 2022. 164 с.
- Чевычелов А.П., Собакин П.И., Кузнецова Л.И. Географо-генетические особенности почвообразования и разнообразие мерзлотных почв Центральной Якутии // Почвы и окружающая среда [Электронный ресурс]: Сборник научных трудов Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 55-летию Института почвоведения и агрохимии СО РАН (Новосибирск, 2–6 октября 2023 г.). Новосибирск: ИПА СО РАН, 2023. С. 210–214. DOI: <https://doi.org/10.31251/conf1-2023>.
- Шелудякова В.А., Караваев М.Н., Петров А.М. Луга и пастбища Центральной Якутии // Материалы о природных условиях и сельском хозяйстве Центральной Якутии. Москва: Изд-во АН СССР, 1954. С. 235–274.
- World reference base for soil resources 2006. IUSS Working Group. World Soil Resources Reports No. 103. FAO, Rome. 146 p.

Поступила в редакцию 24.11.2023

Принята 17.02.2024

Опубликована 27.02.2024

Сведения об авторах:

Чевычелов Александр Павлович – доктор биологических наук, главный научный сотрудник отдела почвенных исследований, Институт биологических проблем криолитозоны – обособленное структурное подразделение ФИЦ ЯНЦ СО РАН (г. Якутск, Россия); chev.soil@list.ru.

Собакин Пётр Иннокентьевич – доктор биологических наук, главный научный сотрудник отдела почвенных исследований, Институт биологических проблем криолитозоны – обособленное структурное подразделение ФИЦ ЯНЦ СО РАН (г. Якутск, Россия); radioecolog@yandex.ru.

Кузнецова Любовь Ивановна – инженер-исследователь отдела почвенных исследований, Институт биологических проблем криолитозоны – обособленное структурное подразделение ФИЦ ЯНЦ СО РАН (г. Якутск, Россия); likkol@yandex.ru.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.



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

Geographical and genetic features of soil formation and diversity of the permafrost soils of Central Yakutia

© 2024 A. P. Chevychelov , P. I. Sobakin , L. I. Kuznetsova 

Institute of Biological Problems of Cryolithozone, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Lenin Avenue, 41, Yakutsk, 677980, Russia. E-mail: chev.soil@list.ru

The aim of the study. *The aim of this article was to identify the geographical and genetic features of soil formation in the cryolithozone of Central Yakutia and to assess the diversity of all types of permafrost soils of this territory.*

Location and time of the study. *Soil-geographical and soil-genetic studies were carried out near the Middle Lena, on the territory of Central Yakutia within various geomorphological tiers of the Central Yakut Plain at different times, starting from the 1990s.*

Methodology. *In carrying out these works, widely used methods of soil research were used, such as comparative geographical, profile genetic and comparative analytical in combination with well-known and commonly used analytical methods. At the same time, all the main results of soil studies conducted on this territory by our predecessor permafrost soil scientists were taken into account in a comparative aspect.*

Main results. *According to the obtained results, it is necessary to state that this region of the cryolithozone is characterized by extremely peculiar landscape and climatic conditions of soil formation, the formation of the cryogenic soils occurring in a cryoarid climate, mainly on loose alluvial deposits of various ages, under forest and meadow-steppe vegetation and continuous permafrost. In the studied territory, the cryogenic soil-forming processes are crucial for the development of properties, composition and regimes of these permafrost soils, causing their high diversity and diversity of the soil cover of Central Yakutia. The systematic list of permafrost soils of the studied territory includes 17 types and 21 subtypes of soils and is forecasted to expand as the study of the soil cover of this unique region of the cryolithozone deepens. At the same time, the diversity of soils there is formed by the six types of zonal and azonal forest, five types of meadow-steppe and five intrazonal types of the permafrost soils. A broader concept of "permafrost soils" is proposed, in contrast to that interpreted in the current classification of soils of Russia and WRB, the essence of which is that regardless of the depth of seasonal thawing, all soils underlain by the permafrost are called permafrost soils. In these soils, the interlocking of seasonally and permanently frozen layers is observed in winter. These soils may differ in pronounced cryomorphic features (cryozems, fawn) or not have them (podburs, podzols, chernozems), being characterized by a permafrost type of temperature regime.*

Conclusion. *In the cryolithozone environment of Central Yakutia, elementary soil-forming processes occur under cryogenesis conditions, which in the general hierarchy of soil-forming factors is considered at the subfactorial level; minor variations of the soil-forming factors can change the directions and rates of the soil-forming processes and, ultimately, lead to a high degree of diversity and contrast in the soil cover of the studied territory.*

Keywords: *Central Yakut plain; soil formation factors; permafrost soils; soil composition and properties; soil diversity.*

How to cite: *Chevychelov A.P., Sobakin P.I., Kuznetsova L.I. Geographical and genetic features of soil formation and diversity of the permafrost soils of Central Yakutia. The Journal of Soils and Environment. 2024. 7(1). e233 (in Russian with English abstract). DOI: [10.31251/pos.v7i1.233](https://doi.org/10.31251/pos.v7i1.233)*

FUNDING

The study was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project: No. 0297-2021-0027, EGISU R&D AAAAA-A21-121012190033-5).

REFERENCES

- Arinushkina E.V. Manual on chemical analysis of soils. Moscow: Publishing House of MSU, 1970. 487 p. (in Russian).
- Vorobyova L.A. Chemical analysis of soils. M.: Publishing House of MSU, 1989. 272 p. (in Russian).
- Desyatkin R.V. Soil formation in thermokarst basins–alas of the cryolithozone. Novosibirsk: Nauka Publ., 2008. 324 p. (in Russian).
- Dimo V.N., Rozov N.N. Thermal criteria as the basis of facial-provincial separation of soils. Pochvovedenie. 1974. No. 5. P. 12–22. (in Russian).

- Unified State Register of Soil Resources of Russia. Version 1.0. Collective monograph. Moscow: V.V. Dokuchaev Soil Institute of the Russian Agricultural Academy, 2014. 768 p. (in Russian).
- Yelovskaya L.G., Konorovsky A.K. Zoning and reclamation of permafrost soils of Yakutia. Novosibirsk: Nauka Publ., 1978. 176 p. (in Russian).
- Yelovskaya L.G. Classification and diagnostics of permafrost soils of Yakutia. Yakutsk: YAF SB OF the USSR Academy of Sciences, 1987. 172 p. (in Russian).
- Zolnikov V.G. Soils of the eastern half of Central Yakutia and their use. In book: Materials on natural conditions and agriculture of Central Yakutia. Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1954. P. 55–221. (in Russian).
- Kachinsky N.A. Mechanical and microaggregate composition of soil and methods of its study. Moscow: USSR Academy of Sciences, 1958. 190 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. Frieв. Moscow: Kolos Publ., 1977. 224 p. (in Russian).
- Classification and diagnostics of soils of Russian / Authors and compilers: L.L. Shishov, V.D. Tonkonogov, I.I. Lebedeva, M.I. Gerasimov. Smolensk: Oykumena Publ., 2004. 342 p. (in Russian).
- Konorovsky A.K. About soil zones of Central Yakutia. In book: Soils of the BAM zone. Novosibirsk: Nauka Publ., 1979. 176–184. (in Russian).
- Konorovsky A.K. Zonality and permafrost of the soils of Yakutia. Yakutsk, 1990. 43 p. (in Russian).
- Makeev O.V. Soil cryogenesis. Pushchino, 1985. 40 p. (in Russian).
- Olenev A.M. The impact of macrorelief on climate and landscape complexes. Sverdlovsk, 1987. 88 p. (in Russian).
- Workshop on soil science / Edited by I.S. Kaurichev. Moscow: Kolos Publ., 1980. 272 p. (in Russian).
- Rode A.A. System of research methods in soil science. Novosibirsk: Nauka Publ., 1971. 92 p. (in Russian).
- Rozanov B.G. Morphology of soils. Moscow: Publishing house of MSU, 1983. 320 p. (in Russian).
- Savvinov D.D. Physics of permafrost soils: Selected works. Novosibirsk: Nauka Publ., 2013. 504 p. (in Russian).
- Skrybykina V.P., Chevychelov A.P. Trends of climatic indicators of valley-hollow soil zonality of Central and Southern Yakutia. Bulletin of Tomsk State University. 2003. No. 3. P. 294–296. (in Russian).
- Skrybykina V.P. Podzols of Central Yakutia. Nauka i obrazovaniye (Science and education). 2017. No. 2. P. 83–90. (in Russian).
- Targulyan V.O., Gerasimova M.I. The world correlative base of soil resources: the basis for international classification and correlation of soils. Moscow: Association of Scientific Publications of the CMC, 2007. 278 p. (in Russian).
- Chevychelov A.P., Skrybykina V.P., Vasil'eva T.I. Geographic and genetic specificity of permafrost-affected soils in Central Yakutia. Eurasian Soil Science. 2009. Vol. 42. No. 6. P. 600–608. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229309060039>.
- Chevychelov A.P., Shakhmatova E.Y. Postpyrogenic polycyclic soils in the forests of Yakutia and Transbaikal region. Eurasian Soil Science. 2018. Vol. 51. No. 2. P. 241–250. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229318020023>.
- Chevychelov A.P., Gorokhov A.N., Nikolaeva O.A., Korobkova T.S., Sabaraikina S.M. Soil and vegetation cover of the Yakut Botanical Garden. Novosibirsk: SB RAS, 2022. 164 p. (in Russian).
- Chevychelov A.P., Sobakin P.I., Kuznetsova L.I. Geographical and genetic features of soil formation and diversity of permafrost soils of Central Yakutia. In book: Soils and Environment [Electronic resource]: Collection of scientific papers of the All-Russian scientific conference with international participation, dedicated to the 55th anniversary of the Institute of Soil Science and Agrochemistry SB RAS (Novosibirsk, October 2–6, 2023). Novosibirsk: SSA SB RAS, 2023. P. 210–214. DOI: <https://doi.org/10.31251/conf1-2023>. (in Russian).
- Sheludyakova V.A., Karavaev M.N., Petrov A.M. Meadows and pastures of Central Yakutia. Materials on natural conditions and agriculture of Central Yakutia. Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1954. P. 235–274. (in Russian).
- World reference base for soil resources 2006. IUSS Working Group. World Soil Resources Reports No. 103. FAO, Rome. 146 p.

*Received 24 November 2023
Accepted 17 February 2024
Published 27 February 2024*

About the authors:

Alexander P. Chevychelov – Doctor of Biological Sciences, Principal Researcher of the Department of Soil Research, Institute of Biological Problems of Cryolithozone of the Siberian Branch of the RAS – Division of Federal Research Centre “The Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences” (Yakutsk, Russia); chev.soil@list.ru.

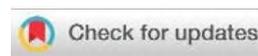
Pyotr I. Sobakin – Doctor of Biological Sciences, Principal Researcher of the Department of Soil Research, Institute of Biological Problems of the Cryolithozone of the Siberian Branch of the RAS – Division of Federal Research Centre “The Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences” (Yakutsk, Russia); radioecolog@yandex.ru.

Lyubov I. Kuznetsova – Research Engineer of the Department of Soil Research, Institute of Biological Problems of the Cryolithozone - of the Siberian Branch of the RAS – Division of Federal Research Centre “The Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences” (Yakutsk, Russia); likkol@yandex.ru.

The authors read and approved the final manuscript



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



Характеристика природно-ресурсного потенциала сельскохозяйственной зоны Красноярского края

© 2024 А. А. Шпедт ^{1,2}, В. В. Злотникова ¹, Д. В. Емельянов ¹

¹ФГБНУ Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр СО РАН», ул. Академгородок, 50, г. Красноярск, 660036, Россия. E-mail: shpedtalexandr@rambler.ru

²ФГАОУ ВО Сибирский федеральный университет, Свободный проспект, 79, Красноярск, 660041, Россия.

Цель исследования. Оценить природно-ресурсный потенциал (ПРП) сельскохозяйственной территории природных округов Красноярского края, изучить основные характеристики климатических условий.

Место и время проведения. Для исследования климатических условий использовали многолетние данные (с 1978 по 2020 гг.) 22 метеорологических станций, расположенных в природных округах Красноярского края.

Методы. Для оценки ПРП использовали георесурсную базу данных, включающую информацию о почвах, агроклиматических параметрах и их влиянии на сельскохозяйственные культуры. Почвы и климатические параметры были ранжированы в баллах от 5 до 100. Оценка ПРП выполнена по следующей градации (балл): 1–20 – низкий; 21–40 – пониженный; 41–60 – средний; 61–80 – повышенный; 81–100 – высокий. Анализ климатических условий проведен на основе многолетних данных метеорологических станций в различных природных округах Красноярского края с использованием методов тренд-анализа и сглаживания данных для выявления динамики.

Основные результаты. Значения почвенного потенциала варьируют от 32,5 баллов для дерново-подзолистых почв северной лесостепи Канского природного округа до 62,5 баллов для черноземов выщелоченных и обыкновенных северной лесостепи Южно-Минусинского природного округа. Средневзвешенные значения ПРП сельскохозяйственной территории Красноярского края увеличиваются в ряду (балл): подтайга (38,0) – Канский природный округ (45,4) – Красноярский природный округ (46,3) – Ачинско-Боготольский природный округ (47,4) – Чулымско-Енисейский природный округ (47,8) – Назаровский природный округ (49,4) – Южно-Минусинский природный округ (54,3).

Заключение. Потепление климата, сопровождаемое существенным повышением количества летних и зимних осадков, смягчением зим и удлинением вегетационного периода, благоприятного для сельскохозяйственных культур и прохождения фазы растений, положительно отразится на ПРП агроландшафтов региона и развитии товарного земледелия, особенно в лесостепной зоне. Может быть расширен видовой и сортовой состав сельскохозяйственных культур; предположительно, эффективным станет возделывание озимых и твердых сортов пшеницы. Улучшение природных условий будет способствовать вовлечению в сельскохозяйственное производство залежных земель. Изменение режимов и свойств почв обусловит трансформацию технологий возделывания сельскохозяйственных культур.

Ключевые слова: природно-ресурсный потенциал; изменение климата; сельскохозяйственные земли; природный округ; подтайга; лесостепь; степь; сумма активных температур; сумма осадков.

Цитирование: Шпедт. А.А., Злотникова В.В., Емельянов Д.В. Характеристика природно-ресурсного потенциала сельскохозяйственной зоны Красноярского края // Почвы и окружающая среда. 2024. Том 7. № 1. e235. DOI: [10.31251/pos.v7i1.235](https://doi.org/10.31251/pos.v7i1.235)

ВВЕДЕНИЕ

Оценка природно-ресурсного потенциала (ПРП) территории во многом определяет перспективы дальнейшего ее использования. В сельскохозяйственном природопользовании используют различные виды оценки земель. Они зависят от их назначения и использования. Преобладающие представления об оценке земель сформировались в период массового освоения и были полностью ориентированы на потребителя. Принятие декларации по окружающей среде и развитию в 1992 году в Рио-де-Жанейро и адаптивной парадигмы управления окружающей средой поставили задачи экологизации экономики в зависимости от конкретных условий окружающей среды. Начались поиски компромисса между интенсификацией и экологичностью производства, спектр учитываемых природных условий расширился и, как следствие, повысились требования к дифференцированной оценке земель (Kiryushin, 2020).

Проблема оценки ПРП сельскохозяйственных земель имеет долгую и сложную историю. Наиболее активный период развития оценки земель пришёлся на 1960-70-е годы, когда в разных странах было предложено множество группировок, классификаций и методов оценки земель. За

рубежом широко используют метод оценки пригодности земель для сельскохозяйственного использования, рекомендованный ФАО в 1970-х годах (Soil Resources Management ..., 1976). Согласно этому методу, каждый показатель оценки получает определенный балл (рейтинг), а индекс оценки земли рассчитывают как среднее арифметическое общего количества баллов.

Основным методом оценки земель в СССР являлся естественноисторический подход В.В. Докучаева и бонитировка почв. Теоретической основой бонитировки почв служили установленные В.В. Докучаевым закономерные соотношения между составными частями почвы (закон корреляции в почвоведении), а также между почвами и урожайностью сельскохозяйственных культур. Эти закономерные соотношения не только облегчали более глубокое познание природы почв, но и, что не менее важно, давали возможность правильно выбрать критерии их бонитировки. Главным основанием бонитировки почв служили их природные качества как наиболее объективные и надёжные показатели.

На сегодняшний день природопользование необходимо осуществлять по пути устойчивого развития, сохраняя ПРП территории для будущих поколений. Стратегия устойчивого управления природными ресурсами учитывает не только экономическую эффективность производства, но и включает мероприятия, которые обеспечивают защиту природных ресурсов, уменьшают эрозию почв и предотвращают деградацию земель. Приняв определенные современные технологии и извлекая уроки из прошлого, наше общество сможет и дальше сохранять почвенные ресурсы и производить продукты питания, достаточные для удовлетворения текущих и будущих потребностей населения.

Рациональное, устойчивое природопользование должно базироваться на основе объективной оценки ПРП агроландшафтов, т. е. его исходного состояния и динамики в процессе использования. Качественная оценка ПРП территории служит важным инструментом оптимизации природопользования, включает в себя полный учёт особенностей природной среды, ландшафта, условий тепло- и влагообеспеченности, позволяет повышать продуктивность производственной деятельности, способствует охране и воспроизводству полезных качеств земли, является основой для принятия решений по использованию земель.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Сельское хозяйство Красноярского края находится в зоне рискованного земледелия. Выращиванием сельскохозяйственной продукции занимаются в центральных и южных частях края. В структуре земель Красноярского края земли сельскохозяйственного назначения составляют 16,80% (39757 тыс. га), из них пашни – 2960 тыс. га. (Государственный доклад ..., 2020).

Земледельческая территория находится в сложных геоморфологических условиях. Её западная часть отделена р. Енисей и представляет собой Западно-Сибирскую низменность, восточная – юго-западная часть Средне-Сибирского плоскогорья, южная – горы Южной Сибири, межгорные впадины и котловины. Разные авторы дают своё название при районировании данной территории, однако разграничивают ее одинаково (Воскресенский, 1980; Воскресенский и др., 1957; Брицина, 1962).

Вся земледельческая территория представлена шестью природными округами (рисунок): Южно-Минусинский, Чулымо-Енисейский, Назаровский, Ачинско-Боготольский, Красноярский, Канский (Система земледелия ..., 2015). Каждый из округов характеризуется собственными природными условиями или отдельными компонентами природы, но, в то же время, имеют много общего; здесь сложились условия для формирования чернозёмов.

Из-за большой протяжённости земледельческой части с севера на юг, а также наличия горных систем и котловин, климат территории имеет свои особенности. Суммарное годовое количество солнечной радиации изменяется от 89 в Енисейске до 100 ккал (см²×мин) в Минусинске. Сумма активных температур в пределах края варьирует в широких пределах – от 1400 до 2000 °С. Увеличение теплообеспеченности происходит с севера на юг, с востока на запад, а также от периферий котловин к их центру. Аналогичное положение с протяжённостью безморозного периода, датами весенних и осенних заморозков и т.д. Годовое количество осадков также распределено неравномерно: ведущую роль здесь играют горные системы, каждый горный кряж аккумулирует влагу на наветренных склонах. В отдельные годы на таких склонах фиксируется 600–700 мм осадков в год. Так как основные земледельческие территории находятся в межгорных котловинах, количество осадков здесь существенно меньше (Крупкин, 2002).

Принимая во внимание сложные геоморфологические и климатические условия, оценка ПРП играет важную роль в создании единого механизма, который будет обеспечивать устойчивое природопользование.

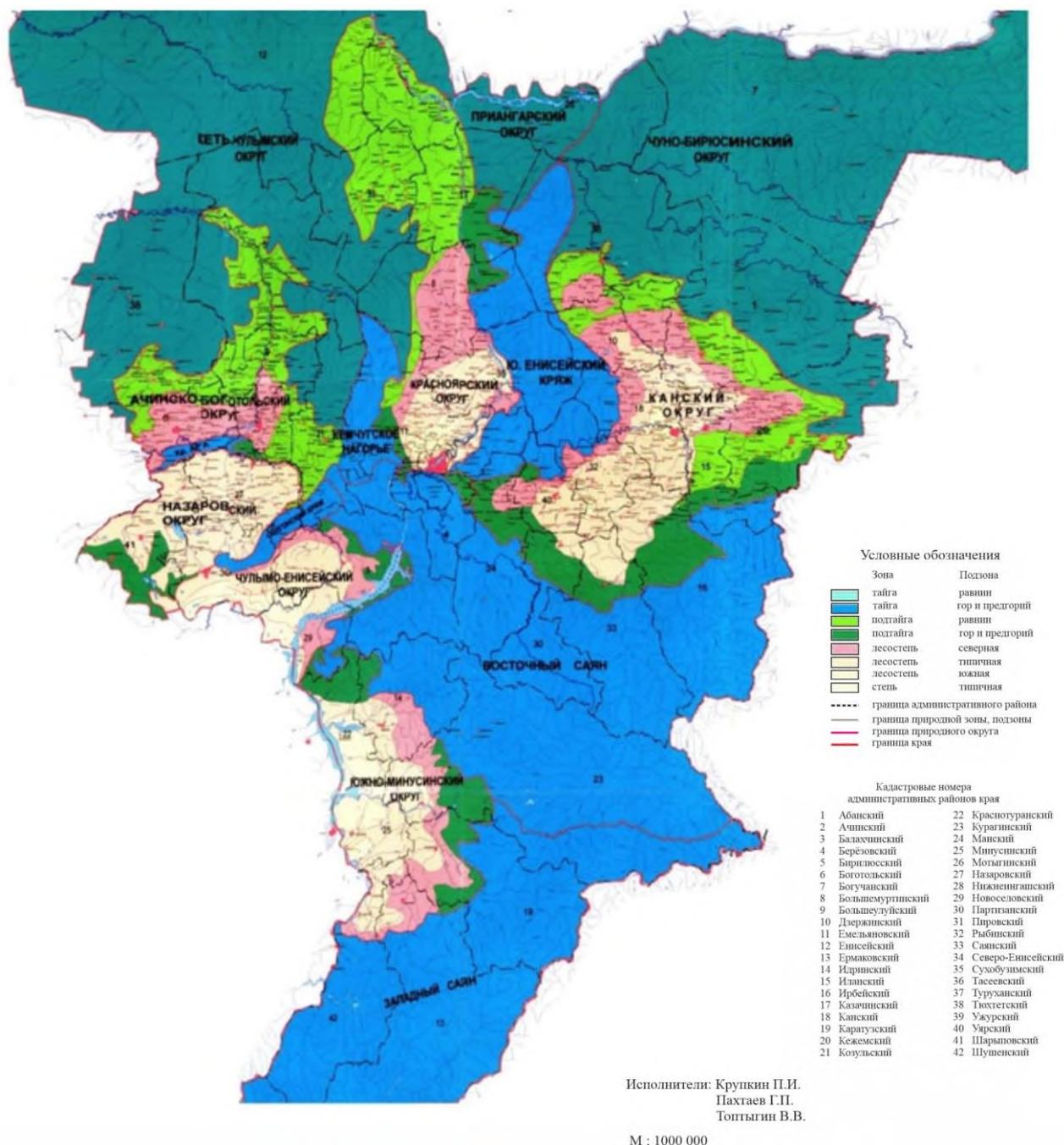


Рисунок. Карта природного районирования земельной части Красноярского края.

За единицы оценки использованы геоморфологические (природные) округа, природно-территориальные зоны и подзоны, характеризующиеся едиными условиями тепло- и влагообеспеченности. Зоны и подзоны выделены по характеру климата, растительности и почвенного покрова.

Оценку ПРП проводили на основе георесурсной базы данных, включающей систематический список почв, используемых в земледелии, и агроклиматических параметров, имеющих тесную связь с продуктивностью сельскохозяйственных культур, таких как сумма температур воздуха выше 10°C ($\sum t > 10^\circ\text{C}$) и годовая сумма осадков ($\sum \text{осадков}$, мм/год). Все почвы и климатические параметры проранжированы в баллах от 5 до 100 (Шпедт, Трубников, 2020).

Расположенные в начале формулы показатели ПРП оказывают наибольшее влияние на результат. Например, для почв таёжной и лесостепной зоны велико значение теплообеспеченности (Т), поэтому уравнение имеет вид:

$$\text{ПРП} = T \vee (O \vee П), \quad (1)$$

где ПРП – природно-ресурсный потенциал, балл; Т – балл за сумму температур выше 10 °C; О – балл за годовую сумму осадков; П – балл за тип и подтип почвы; ∨ – знак нелинейного логического

сложения. Ранжирование баллов за почву, сумму температур выше 10 °С и годовую сумму осадков представлено в методике оценки природно-ресурсного потенциала агроландшафтов России (Шпедт, Трубников, 2020).

Для почвы, расположенной в степной и сухостепной зоне, в дефиците будут осадки, поэтому уравнение принимает вид:

$$\text{ПРП} = \text{O} \vee (\text{T} \vee \text{П}), \quad (2)$$

В результате нелинейного логического сложения частных потенциалов, оценку ПРП рекомендуется выполнять по следующей градации (балл): 1–20 – низкий; 21–40 – пониженный; 41–60 – средний; 61–80 – повышенный; 81–100 – высокий (Шпедт, Трубников, 2020).

С климатом связаны глобальные и региональные почвенно-географические закономерности, определяющие интенсивность и доходность земледелия. Для оценки климатических условий использовали многолетние данные 22 метеорологических станций, расположенных в природных округах Красноярского края. Для расчёта использовали среднегодовую температуру воздуха и годовую сумму осадков станций таких природных округов, как Канский, Красноярский, Ачинско-Боготольский, Чулымо-Енисейский, Южно-Минусинский. Для анализа использовали доступную информацию, получаемую из открытых источников (ВНИИГМИ-МЦД, «Погода и климат»).

Для анализа временных рядов применяли тренд-анализ. Чтобы отчётливо определить периоды с положительной и отрицательной динамикой данные сглаживали при помощи 11-летнего скользящего среднего. Далее его линейное уравнение и величину достоверности аппроксимации (R^2) использовали для оценки исследуемого периода (Грешилов, 1997).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Почвенный потенциал варьирует от 32,5 до 62,5 баллов (табл. 1). Для дерново-подзолистых почв северной лесостепи Канского природного округа получены низкие значения по сравнению с чернозёмами выщелоченным и обыкновенным северной лесостепи Южно-Минусинского природного округа, что обусловлено различием почвенных свойств и климатическими условиями.

Чернозёмные почвы занимают около 62% в структуре пахотных массивов сельскохозяйственной территории Красноярского края. Различия значений ПРП черноземов объясняется разнообразием климатических условий (Шпедт, Злотникова, 2022). Например, значения ПРП чернозёма обыкновенного, расположенного в южной лесостепи Чулымо-Енисейского природного округа, составляет 50,7 балла, а расположенного в северной лесостепи Южно-Минусинского природного округа – 62,5. Тепло- и влагообеспеченность в Чулымо-Енисейском округе на порядок ниже, чем в Южно-Минусинском и равна $\sum t > 10 \text{ °C} - 1610 \text{ °C}$, $\sum \text{осадков} - 364 \text{ мм/год}$, что в балльной системе означает 30,0 и 36,4 баллов. Южно-Минусинский природный округ лучше обеспечен теплом и влагой: $\sum t > 10 \text{ °C} - 1760 \text{ °C}$, $\sum \text{осадков} - 562 \text{ мм/год}$, что согласно градации, соответствует 37,5 и 56,2 баллам.

Весьма существенно отличается по количеству тепла и влаги степная зона от лесостепных зон всех округов. Наиболее тёплыми являются подзоны Южно-Минусинской лесостепи, наиболее холодными – Чулымо-Енисейской. Подтаёжная зона в среднем более холодная по сравнению со смежными лесостепными зонами. Эти данные находят отражение в оценке ПРП агроландшафтов. Средневзвешенный ПРП сельскохозяйственной территории Красноярского края варьирует от 38,0 баллов в подтаёжной зоне до 56,4 баллов в типичной степи Южно-Минусинского природного округа. В пределах лесостепной зоны наибольшим ПРП обладает северная подзона Южно-Минусинского природного округа. Средневзвешенный ПРП по округам меняется, в пределах лесостепи – в 1,2 раза. Ещё более контрастно ПРП меняется по природным зонам. В каждом из природных округов есть подзоны, поэтому в пределах округов ПРП несколько нивелирован.

Для земледелия на территории региона наиболее благоприятные условия складываются в типичной степи, где ПРП равен 56,4 балла. Также высоким ПРП обладает лесостепь Южно-Минусинского округа – 54,3 балла. Данные значения обусловлены наличием почв со средним и повышенным плодородием. Значения ПРП южной лесостепи Канского и Красноярского природного округа равно 50,7 баллов. Согласно градации, средневзвешенные ПРП всех зон, кроме подтайги, а также природных округов и подзон относятся к средним значениям. Средневзвешенный ПРП подтайги пониженный. Значения средневзвешенных ПРП для северных округов имеют схожую тенденцию – происходит увеличение по подзонам с севера на юг. В Южно-Минусинском природном округе средневзвешенный ПРП увеличивается в обратном направлении.

Таблица 1

Природно-ресурсный потенциал почв (балл) по природным зонам и округам сельскохозяйственной территории Красноярского края

Природная зона	Лесостепь													Степь	Зона подтайги
	Канский			Красноярский			Ачинско-Боготольский	Назаровский	Чулымско-Енисейский		Южно-Минусинский				
Подзона	Юж	Тип	Сев	Юж	Тип	Сев	Сев	Тип	Юж	Тип	Юж	Тип	Сев	Тип	
Дерново-карбонатные							40,3	38,8							37,2
Дерново-подзолистые			32,5			34,8	37,8	36,3		33,3			41,6		34,7
Серые лесные	41,8	39,3	36,3	43,0	37,8	38,5	41,5	40,0	36,6	37,0	46,0	43,8	45,3		38,5
Чернозёмы оподзоленные	45,5	49,3	46,3	46,8	47,8	48,5	51,5	50,0	40,4	47,0	56,0	53,8	55,3		48,5
Тёмно серые	51,8	43,0	40,0	53,0	41,5	42,3	45,3	43,8	46,6	40,8	49,8	47,5	49,1		42,2
Чернозёмы солонцеватые														52,6	
Чернозёмы карбонатные							52,5	50,3						52,6	
Чернозёмы обыкновенные	52,8	53,8	51,5	53,8	51,5	53,8	57,5	55,3	50,7	53,4	54,5	56,8	62,5	57,6	
Чернозёмы выщелоченные	52,8	53,8	51,5	53,8	51,5	51,3	57,5	55,3	50,7	53,4	54,5	56,8	62,5	57,6	55,9
Лугово-чернозёмные	50,3	51,3	49,0	51,3	49,0	53,8	55,0	52,8	48,2	50,9	52,0	54,3	59,9		53,4
Чернозёмы южные														55,1	
Болотные	46,5	46,0	36,8	47,3	44,8	38,3	40,5	39,3	44,1	37,6	48,5	48,5	43,4		38,9
Пойменные	39,0	38,5	44,3	39,8	37,3	45,8	48,0	46,8	36,6	45,1	41,0	41,0	50,9		46,5

Примечание.

Обозначение подзон: Юж – южная, Тип – типичная, Сев – северная.

В таблице 2 приведены расчёты средневзвешенного ПРП агроландшафтов, согласно площади каждой почвы, для подзоны, природного округа и для всей сельскохозяйственной территории.

Таблица 2

Средневзвешенный природно-ресурсный потенциал (ПРП) природных округов, подзон и зон

Природная зона	Природный округ	Подзона	Площадь, тыс. га	Средневзвешенный ПРП	
Лесостепь	Канский	южная	73	50,7	45,4
		типичная	920	46,5	
		северная	540	42,9	
	Красноярский	южная	85	50,7	46,3
		типичная	302	46,5	
		северная	390	45,2	
	Ачинско-Боготольский	северная	321	47,4	47,4
	Назаровский	типичная	755	49,4	49,4
	Чулымско-Енисейский	южная	154	47,5	47,8
		типичная	338	47,9	
	Южно-Минусинский	южная	204	53,3	54,3
		типичная	584	53,8	
северная		472	55,4		
Степь	Южно-Минусинский	типичная	144	56,4	56,4
Подтайга			2878	38,0	38,0

Исследования климатологов показали, что природный потенциал территории определяется гармоничным сочетанием света, тепла, влаги и питательных веществ для растений. По данным предыдущих исследований известно, что наблюдается повышение хода среднегодовых температур с 1971 года и сумм осадков с 1978 года (Второй оценочный доклад ..., 2014; Shpedt et al., 2019). Анализ полученных данных свидетельствует о том, что за этот период на территории природных округов произошло увеличение среднегодовой температуры воздуха на 1,57 °С при тренде равном +0,032 °С/год ($R^2 = 0,67$), достигшее 1,48 °С в 2020 году. Также отмечено увеличение суммы осадков на 95 мм при тренде 2,3 мм/год ($R^2 = 0,85$), достигшее значения 497 мм в 2020 году. (Шпедт и др., 2023).

За исследуемый период на территории всех природных округов произошло увеличение среднегодовых температур и сумм осадков (табл. 3, 4).

Таблица 3

Тренд среднегодовой температуры воздуха за 1971–2020 гг.

Природный округ	Среднегодовая температура на 1971 год, °С	Среднегодовая температура на 2020 год, °С	Значение тренда температур, °С/год	R^2
Чулым-Енисейский	-0,79	0,19	+0,0201	0,43
Южно-Минусинский	0,58	2,14	+0,0317	0,65
Канский	-0,54	1,08	+0,0330	0,68
Красноярский	-0,28	1,43	+0,0350	0,70
Ачинско-Боготольский	0,42	2,15	+0,0353	0,59

Примечание (здесь и далее в табл. 4).

R^2 – величина достоверности аппроксимации.

Таблица 4

Тренд среднегодовой суммы осадков за 1978–2020 гг.

Природный округ	Среднегодовая сумма осадков на 1978 год, мм	Среднегодовая сумма осадков на 2020 год, мм	Значение тренда сумм осадков, мм/год	R^2
Ачинско-Боготольский	466,4	504,6	+0,909	0,43
Чулым-Енисейский	372,6	413,8	+0,9813	0,46
Южно-Минусинский	383,3	483,2	+2,3782	0,66
Красноярский	442,7	545,4	+2,4462	0,79
Канский	384,3	504,2	+2,8557	0,83

Наиболее надежные тренды выявлены для Красноярского, Канского и Южно-Минусинского природных округов. Здесь отмечается более быстрое увеличение среднегодовых температур и общего количества осадков, что приводит к повышению тепло- и влагообеспеченности этих территорий.

Сиротенко О.Д. с соавторами (2007) показали, что наблюдаемые за последние 30 лет изменения климата способствуют росту потенциальной продуктивности сельского хозяйства на значительной части территории РФ, где производится не менее 85% сельскохозяйственной продукции. Вместе с тем, отмечается рост аридности климата в ряде районов Сибири, приводящий к снижению продуктивности агроферы.

Предполагаем, что трансформация почвенно-земельных ресурсов Красноярского края происходит следующим образом. Основные преобразования происходят на видовом, родовом и подтиповом уровнях; редко один тип почв сменяется другим. Эти изменения идут в местах смены природных зон и подзон, отчасти в переходных полосах. На большей части каждой природной зоны и подзоны зональные и провинциальные свойства почв сохраняются.

В южной тайге происходит изменение соотношения дерново-подзолистых и подзолистых почв в пользу первых. При смещении границы южной тайги к северу наблюдается замена дерново-подзолистых почв серыми лесными почвами. В настоящее время морфологически различить эти типы почв довольно сложно. Происходит естественное осушение болот и деградация торфяных слоев. В равнинных таёжных районах, при улучшении климатических параметров, ограничивающим фактором для сельского хозяйства становятся почвенные условия, прежде всего, дефицит элементов питания. Значение данной подзоны в сельскохозяйственном производстве растёт (Shpedt et al., 2019).

В южной тайге и северной лесостепи усиливается процесс гумусонакопления. В лесостепи меняется соотношение чернозёмов, лугово-чернозёмных и серых лесных почв. Лугово-чернозёмные и тёмно-серые лесные почвы можно будет диагностировать как чернозёмы выщелоченные и оподзоленные. Содержание, запасы и состав гумуса почвы остаются прежними на пахотных землях. Почвы, находящиеся под пашней, подвергаются дегумификации. На части пахотных массивов мощность гумусового горизонта уменьшается. При уменьшении гумусового горизонта <20–22 см происходит припахивание почвообразующих пород. Выход на дневную поверхность и поступление в гумусовый горизонт позднеплейстоценовых, высококарбонатных пород сартанской свиты резко ухудшает свойства почв, приводит к снижению их плодородия и сельскохозяйственной значимости (Шпедт, 2021).

В летний период запасы воды в метровом слое данных почв, благодаря увеличению осадков, остаются без изменения. Вместе с тем из-за увеличения количества тепла торфяная толща интенсивно минерализуется. Возрастает площадь остепенённых участков, где усиливается степень солонцеватости почв.

Для почв степных ландшафтов увеличивается степень иссушения. Согласно модельным комплексным прогнозам при сохранении современного уровня агротехники и географического распространения посевов, урожайность зерновых культур в степной зоне может снизиться на 20–25% (Shpedt et al., 2019). Увеличиваются площади земель, подверженные дефляционным процессам, усиливается процесс дегумификации почв. В сухостепных ландшафтах требуется развитие оросительной инфраструктуры, без которой невозможно станет вести экономически рентабельное земледелие. Без орошения значительную часть пахотных земель можно будет использовать только как малопродуктивные пастбища. Лимитирующим фактором плодородия в лесостепной и степной зоне является недостаток элементов питания растений, что требует применения минеральных, прежде всего азотных и фосфорных, удобрений.

Необходимо учесть, что антропогенное воздействие на почвенно-земельные ресурсы превышает воздействие естественных природных изменений. Существует повышенный риск технологической деградации почв, эрозии, образования солонцов и засоления, опустынивания, засух и пожаров. Естественная граница леса в природных округах смещается от центра к периферии. В таких условиях экологическое состояние ландшафтов и почвенно-земельных ресурсов зависит от уровня развития интеллектуальных и производственных ресурсов агросообщества. Кроме того, важно внедрение системы регулярных и детальных наблюдений для выявления тенденций изменений и прогнозирования состояния почв.

В результате иссушения болот (степень заболоченности лесостепной зоны составляет более 5%) в оборот могут быть вовлечены значительные массивы пригодных для сельскохозяйственного пользования почв. В оборот должны поступить значительные площади (около 1 млн га) залежных земель, на которых идёт интенсивное воссоздание природных зональных биогеоценозов, а также восстановление гумусного состояния почв и запасов элементов питания растений.

ВЫВОДЫ

Продуктивность и устойчивость системы землепользования определяется взаимодействием между земельными ресурсами, климатом и деятельностью человека. В условиях изменения климата, выбор правильных систем землепользования имеет важное значение для минимизации деградации земель, восстановления нарушенных земель, обеспечения устойчивого использования земельных ресурсов. Согласно средневзвешенным значениям природно-ресурсного потенциала (ПРП) условия возделывания сельскохозяйственных культур улучшаются в ряду (балл): подтайга (38) – Канский природный округ (45,4) – Красноярский природный округ (46,3) – Ачинско-Боготольский природный округ (47,4) – Чулым-Енисейский природный округ (47,8) – Назаровский природный округ (49,4) – Южно-Минусинский природный округ (54,3). Средневзвешенный ПРП для всей земледельческой территории равен 45,0 баллам, что соответствует среднему значению.

Потепление климата, сопровождаемое увеличением количества зимних и летних осадков, смягчением зим и удлинением вегетационного периода, благоприятного для культурных растений и прохождения их фенофаз, окажет положительное влияние на развитие товарного земледелия региона, преимущественно в лесостепной зоне. Не исключено расширение видового и сортового состава сельскохозяйственных культур, вероятно, оптимальным станет возделывание озимых и твёрдых сортов пшеницы. Преобразование природных условий будет способствовать вовлечению в сельскохозяйственное производство залежных почв. Изменение режимов и свойств почв обусловит модификацию технологий возделывания сельскохозяйственных культур.

ЛИТЕРАТУРА

- Брицина М.П., Галахов Н.Н., Ерохина А.А., Любимова Е.Л., Лиханов Б.Н. Схема природного районирования центральной части Красноярского края // Природное районирование центральной части Красноярского края и некоторые вопросы пригородного хозяйства. Москва: АН СССР, 1962. С. 27–46.
- Воскресенский С.С. Геоморфологическое районирование СССР. Высшая школа: Москва, 1980. 343 с.
- Воскресенский С.С., Леонтьев О.К., Спиридонов А.И. Геоморфология Сибири. Москва: МГУ, 1957. 316 с.
- ВНИИГМИ-МЦД (Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – мировой центр данных). Режим доступа: <http://mete.ru>.
- Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Москва: Росгидромет, 2014. 1008 с.
- Государственный доклад «О состоянии и охране окружающей среды в Красноярском крае в 2019 году». Красноярск, 2020. 314 с.
- Грешилов А.А., Стакун В.А., Стакун А.А. Математические методы построения прогнозов. Москва: Радио и связь, 1997. 112 с.
- Крупкин П.П. Черноземы Красноярского края. Красноярск: КрасГУ, 2002. 332 с.
- Сиротенко О.Д., Груза Г.В., Ранькова Э.Я., Абашина Е.В., Павлова В.Н. Современные климатические изменения теплообеспеченности, увлажненности и продуктивности агросферы России // Метеорология и гидрология. 2007. № 8. С. 90–103.
- Система земледелия Красноярского края на ландшафтной основе. Красноярск: Издательство Поликор, 2015. 224 с.
- Погода и климат: онлайн справочник информации о погоде и климате. Режим доступа: <http://www.pogodaiklimat.ru>
- Шпедт А.А. Агрочерноземы Приенисейской Сибири: оценка современного состояния и направление эволюции // Почвы – стратегический ресурс России: тезисы докладов VIII съезда Общества почвоведов им. В.В. Докучаева и Школы молодых ученых по морфологии и классификации почв. Москва–Сыктывкар: Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН, 2021. С. 725–726.
- Шпедт А.А., Злотникова В.В. Оценка природно-ресурсного потенциала почв земледельческой части Красноярского края // Эволюция почв и развитие научных представлений в почвоведении: сборник научных трудов Международной научной конференции, посвященной 90-летию со дня рождения Бурлаковой Лидии Макаровны. Барнаул: Алтайский государственный аграрный университет, 2022. С. 194–198.
- Шпедт А.А., Липшин А.Г., Лубочников М.Г. Глобальные проблемы и вызовы агросферы енисейской Сибири // Современные проблемы и перспективы развития агрохимии, земледелия и смежных наук о плодородии почв и продуктивности полевых культур в Сибири. IX Сибирские Прянишниковские агрохимические чтения: сборник материалов международной научно-производственной конференции с международным участием. Красноярск: ФГБНУ ФИЦ «Красноярский научный центр СО РАН», 2023. С. 85–90. DOI: https://doi.org/10.52686/9785604525050_131.
- Шпедт А.А., Трубников Ю.Н. Методика оценки природно-ресурсного потенциала агроландшафтов России // Живые и биокосные системы. 2020. № 31. С. 1. DOI: <https://doi.org/10.18522/2308-9709-2020-31-1>.
- Kiryushin V.I. Methodology for integrated assessment of agricultural land // Eurasian Soil Science. 2020. Vol. 53. No. 7. P. 960–967. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229320070066>.
- Shpedt A.A., Ligeava N.A., Emelyanov D.V. Multi-year zonal climate change of Middle Siberia // Scientific research of the SCO countries: synergy and integration (Beijing, PRC, 25–26 March 2019). International conference. Scientific publishing house Infinity, 2019. Part 4. P. 178–182.
- Soil Resources Management and Conservation Services, Land and Water Development Division // FAO Soils Bulletin Series, 1976.

Поступила в редакцию 24.11.2023

Принята 11.02.2024

Опубликована 16.02.2024

Сведения об авторах:

Шпедт Александр Артурович – член-корреспондент РАН, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, директор Федерального исследовательского центра «Красноярский научный центр СО РАН» (г. Красноярск, Россия); shpedtaleksandr@rambler.ru

Злотникова Вероника Валерьевна – аспирантка Федерального исследовательского центра «Красноярский научный центр СО РАН» (г. Красноярск, Россия); kogoyakova.v@mail.ru

Емельянов Дмитрий Владимирович – ведущий инженер лаборатории экологической информатики Института Бифизики – обособленное подразделение Федерального исследовательского центра «Красноярский научный центр СО РАН» (г. Красноярск, Россия); dima9526@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/)

Characterization of the natural resource potential of the agricultural zone of the Krasnoyarsk territory

© 2024 A. A. Shpedt ^{1,2}, V. V. Zlotnikova ¹, D. V. Emelyanov ¹

¹Federal Research Center Krasnoyarsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Akademgorodok 50, Krasnoyarsk, Russia. E-mail: shpedtaleksandr@rambler.ru

²Siberian Federal University, Svobodny prospect 79, Krasnoyarsk, Russia.

The aim of the study was to determine the natural resource potential of the agricultural territories in the agricultural regions of the Krasnoyarsk Territory and to investigate the fundamental characteristics of climatic conditions.

Location and time of the study. The study utilized multi-year data (from 1978 to 2020) from 22 meteorological stations located in the natural districts of the Krasnoyarsk Territory to analyze climatic conditions.

Methods. A georesource database was used to assess the natural resource potential (NRP), including information about soils, agroclimatic parameters, and their impact on agricultural crops. Soils and climatic parameters were ranked on a scale of 5 to 100. The NRP assessment was categorized as follows (points): 1–20 – low; 21–40 – below average; 41–60 – average; 61–80 – above average; 81–100 – high. Climatic conditions were analyzed based on multi-year data from meteorological stations in different natural regions of the Krasnoyarsk Territory, using trend analysis and data smoothing methods to identify dynamics.

Results. The **natural resource** potential values vary from 32.5 points for the northern forest-steppe podzolic soils in the Kansk Natural District to 62.5 points for chernozems (black soils) in the northern forest-steppe of the South Minusinsk Natural District. Weighted average NRP values for the agricultural territories of the Krasnoyarsk Krai increase in the following sequence (points): subtaiga (38.0) – Kansk Natural District (45.4) – Krasnoyarsk Natural District (46.3) – Achinsk-Bogotol Natural District (47.4) – Chulymo-Yenisei Natural District (47.8) – Nazarovo Natural District (49.4) – South Minusinsk Natural District (54.3).

Conclusions. Climate warming, accompanied by significant increases in summer and winter precipitation, milder winters, and prolonged growing seasons favorable for agricultural crops and varieties, will have a positive impact on the NRP of the region's agrolandscapes, promoting the development of commercial agriculture, especially in the forest-steppe zone. The range of agricultural crops and varieties may expand. Cultivating winter and hard wheat varieties is expected to become more effective. Improved natural conditions will contribute to bringing long abandoned lands into agricultural production. Changes in soil regimes and properties will lead to the transformation of agricultural crop cultivation technologies.

Keywords: natural resource potential; climate change; agricultural lands; natural region; hemiboreal forest; forest-steppe; steppe; sum of active temperature, sum of precipitations.

How to cite: Shpedt A.A., Zlotnikova V.V., Emelyanov D.V. Characterization of the natural resource potential of the agricultural zone of the Krasnoyarsk territory. *The Journal of Soils and Environment*. 2024. 7(1). e235 (in Russian with English abstract). DOI: [10.31251/pos.v7i1.235](https://doi.org/10.31251/pos.v7i1.235)

REFERENCES

- Bricina M.P., Galahova N.N., Erohina A.A. Lubimova E.L. Lihanov B.N. Scheme of natural zoning of the central part of the Krasnoyarsk Region. Natural zoning of the central part of the Krasnoyarsk Region and some issues of suburban economy. Moscow: Publishing House AS USSR, 1962. P. 27–46. (in Russian).
- Voskresensky S.S. Geomorphological zoning of the USSR. Moscow: Publishing House High School, 1980. 343 p. (in Russian).
- Voskresensky S.S., Leontiev O.K., Spiridonov A.I. Geomorphology of Siberia. Moscow: Publishing House MSU, 1957. 316 p. (in Russian).
- RIHMI-WDC (All-Russian Research Institute of Hydrometeorological Information – World Data Center). Access mode: <http://meteo.ru>. (in Russian).
- The second assessment report of Roshydromet on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation. Moscow: Publishing House Roshydromet, 2014. 1008 p. (in Russian).
- State report “On the state and protection of the environment in the Krasnoyarsk Region in 2019”. Krasnoyarsk, 2020. 314 p. (in Russian).
- Greshilov A.A., Stakun V.A., Stakun A.A. Mathematical methods for making forecasts. Moscow: Publishing House Radio i Svyaz, 1997. 112 p. (in Russian).
- Krupkin P.P. Chernozems of the Krasnoyarsk Region. Krasnoyarsk: Publishing House KrasSU, 2002. 332 p. (in Russian).
- Sirotenko O.D., Abashina E.V., Pavlova V.N., Gruza G.V., Rankova E. Ya. Modern climate-related changes in heat supply, moistening, and productivity of the agrosphere in Russia. Russian meteorology and hydrology. 2007. Vol. 32. No. 8. P. 538–546. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068373907080109>.
- Landscape-based farming system of the Krasnoyarsk Territory. Krasnoyarsk: Publishing House Polycor, 2015. 224 p. (in Russian).
- Weather and Climate: online directory of weather and climate information. Access mode: <http://www.pogodaiklimat.ru>. (in Russian).
- Shpedt A.A. Agrochernozems of the Yenisei Siberia: assessment of the current state and direction of evolution. In book: Soils - a strategic resource of Russia. Abstracts of the VIII Congress of the Society of Soil Scientists named after. V.V. Dokuchaev and the School of Young Scientists on Soil Morphology and Classification. Moscow–Syktyvkar: Institute of Biology of the Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2021. P. 725–726. (in Russian).
- Shpedt A.A., Zlotnikova V.V. Assessment of the natural resource potential of soils in the agricultural part of the Krasnoyarsk Territory. In book: Evolution of soils and the development of scientific ideas in soil science. Collection of scientific papers of the International scientific conference dedicated to the 90th anniversary of the birth of Lidiya Makarovna Burlakova. Barnaul: Altai State Agrarian University, 2022. P. 194–198. (in Russian).
- Shpedt A.A., Lipshin A.G., Lubochnikov M.G. Global problems and challenges of the agro-sphere of Yenisei Siberia. In book: Modern problems and prospects for the development of agrochemistry, agriculture and related sciences on soil fertility and productivity of field crops in Siberia. IX Siberian Pryanishnikov agrochemical readings: collection of materials of the international scientific and industrial conference with international participation. Krasnoyarsk: Federal State Budgetary Institution Federal Research Center "Krasnoyarsk Scientific Center SB RAS", 2023. P. 85–90. DOI: https://doi.org/10.52686/9785604525050_131. (in Russian).
- Shpedt A.A., Trubnikov Yu.N. Methodology for assessing the natural resource potential of agricultural landscapes in Russia. Zhivie i biokostnie sistemy. 2020. Vol. 31. P. 1. DOI: <https://doi.org/10.18522/2308-9709-2020-31-1>. (in Russian).
- Kiryushin V.I. Methodology for integrated assessment of agricultural land. Eurasian Soil Science. 2020. Vol. 53. No. 7. P. 960–967. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229320070066>.
- Shpedt A.A., Ligaeva N.A., Emelyanov D.V. Multi-year zonal climate change of Middle Siberia. In book: Scientific research of the SCO countries: synergy and integration (Beijing, PRC, 25–26 March 2019). International conference. Scientific publishing house Infinity, 2019. Part 4. P. 178–182.
- Soil Resources Management and Conservation Services, Land and Water Development Division. FAO Soils Bulletin Series, 1976.

Received 24 November 2023

Accepted 11 February 2024

Published 16 February 2024

About the authors:

Alexander A. Shpedt – Corresponding member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Head of Federal Research Center Krasnoyarsk Scientific Center, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Krasnoyarsk, Russia); shpedtaleksandr@rambler.ru

Veronika V. Zlotnikova – Postgraduate of Federal Research Center Krasnoyarsk Scientific Center, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Krasnoyarsk, Russia); kogoyakova.v@mail.ru

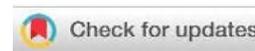
Dmitry V. Emelyanov – Senior Engineer in the Laboratory of Environmental Informatics in the Institute of Biophysics – Separate Division of Federal Research Center Krasnoyarsk Scientific Center, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Krasnoyarsk, Russia); dima9526@gmail.com

The authors read and approved the final manuscript



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

УДК 551.312.2+571.16

<https://doi.org/10.31251/pos.v7i1.246>

Трансформация торфяной залежи и накопление углерода на постпирогенных верховых болотах таёжной зоны Западной Сибири

© 2024 А. А. Синюткина , А. В. Оленникова , Л. Ю. Сун-зу-ли , Л. П. Гашкова 

Сибирский научно-исследовательский институт сельского хозяйства и торфа – филиал Сибирского федерального научного центра агробиотехнологий РАН, ул. Гагарина 3, г. Томск, 634050, Россия.

E-mail: ankalaeva@yandex.ru

Цель исследования. Оценка трансформации водно-физических свойств торфяной залежи и интенсивности торфонакопления на постпирогенных участках осушенных верховых болот таёжной зоны Западной Сибири.

Место и время проведения. Полевые исследования проведены в 2022 году на верховых Бакчарском (участок гидроресомелиорации, 7 площадок) и Усть-Бакчарском (участок, осушенный для добычи торфа, 3 площадки) болотах, расположенных в Томской области.

Методы. Отбор проб торфа проведён из двух скважин на каждой площадке в понижении и повышении микрорельефа. Шаг отбора составлял 5 см, глубина отбора 45–90 см. Методом конверта в девяти точках на каждой площадке выполнен отбор образцов торфа в слое 0–30 см с шагом 10 см для лабораторного определения влажности. Торф охарактеризован по следующим параметрам: влажность (ГОСТ 11306-2013), зольность (ГОСТ 11306-2013), степень разложения и ботанический состав (ГОСТ 28245-89), степень гумификации и насынная кислотности торфа. Расчёт запасов углерода в верхнем слое торфяной залежи проведён с использованием значений зольности и плотности образцов торфа.

Основные результаты. Торфяная залежь верхних горизонтов образована преимущественно сфагновыми торфами с преобладанием в составе растительных остатков *Sphagnum fuscum*. Выявлены различия в свойствах торфа между положительными и отрицательными формами, проявляющиеся до глубины 5–15 см от поверхности понижений. Выгорание понижений привело к трансформации всех свойств торфа до глубины 10–15 см, но в большей степени выражено в увеличении зольности, значения которой в слое 0–5 см в 1,5–9 раз выше в сравнении с фоновым участком. Трансформация свойств торфа на положительных формах рельефа – моховых подушках – в меньшей степени проявляется в верхнем слое 0–5 см, но характеризуется большей глубиной, достигающей 30 см. Трансформация выражена, главным образом, в увеличении зольности, за счёт миграции зольных элементов с поверхности горелых понижений, и плотности, вследствие проседания моховых подушек с погибшим сфагновым мхом. При схожих средних значениях влажности между постпирогенными и фоновыми площадками, составляющими 90–91% в слое 0–30 см, наблюдаются различия в распределении значений по формам микрорельефа. Для постпирогенной площадки на Бакчарском болоте характерно снижение влажности в понижениях и на положительных формах; максимальные значения наблюдаются на высоте около средней поверхности. На Усть-Бакчарском болоте влажность уменьшается от отрицательных форм к положительным. На Бакчарском болоте через 30 лет после пожара аккумуляция торфа происходит только на положительных формах; толщина слоя, сформировавшегося после пожара, достигает 35 см. С учётом неоднородности микрорельефа аккумуляция углерода в период после пожара оценивается в 1,9 кг С/м² или 60 г С/м² в год. На Усть-Бакчарском болоте аккумуляция торфа происходит значительно медленнее и отсутствует на большей части поверхности. Среднее значение оценивается в 7 г С/м² в год.

Заключение. Выгоранию наиболее подвержены отрицательные формы микрорельефа. Через 6–8 лет после пожара его последствия проявляются в обсыхании верхнего слоя торфяной залежи, что препятствует интенсивному зарастанию сфагновыми мхами. На участке лесомелиорации на Бакчарском болоте аккумуляция торфа через 30 лет после пожара на положительных формах сопоставима по интенсивности с невыгоревшими участками.

Ключевые слова: торфяные почвы; микрорельеф; природный пожар; влажность; зольность; степень гумификации; степень разложения; плотность торфа.

Цитирование: Синюткина А.А., Оленникова А.В., Сун-зу-ли Л.Ю., Гашкова Л.П. Трансформация торфяной залежи и накопление углерода на постпирогенных верховых болотах таёжной оны Западной Сибири // Почвы и окружающая среда. 2024. Том 7. № 1. e246. DOI: [10.31251/pos.v7i1.246](https://doi.org/10.31251/pos.v7i1.246).

ВВЕДЕНИЕ

Среди всех типов почв торфяные болотные почвы характеризуются максимальными запасами углерода (150–330 т/га). Углеродный пул этих почв оценивается в 33 Гт, что составляет около 20% общих запасов углерода в верхнем 30-сантиметровом слое почв всей территории России (Чернова и др., 2021). Мощным внешним фактором воздействия на болотные экосистемы являются пожары, представляющие собой один из наиболее значимых агентов потерь углерода торфяными почвами (Глухова, Сирина, 2018; Ефремова и др., 2021; Lin et al., 2021). В связи с отмеченными климатическими изменениями и увеличением антропогенной нагрузки, частота и интенсивность пожаров на болотах растут во всем мире (Глухова, Сирина, 2018; Moore et al., 2017; Feurdean et al., 2020; Ackley et al., 2021; Lin et al., 2021; Marcotte et al., 2022). Пожары на сфагновых болотах существенно влияют на видовое богатство, структуру фитоценозов, темпы накопления биомассы. Воздействие пожаров может трансформировать экосистемы верховых болот из поглотителей углерода в источник не только за счет прямых его выбросов при сгорании биомассы, но и в результате долгосрочных изменений структуры растительного сообщества и функционирования экосистемы (Копотева, Купцова, 2016; Цыганов и др., 2018; Малащук, Филиппов, 2021). Одним из важных последствий пожара на болоте является формирование водоотталкивающего слоя в приповерхностных горизонтах торфа в результате их высыхания под воздействием испарения при экстремальных температурах (Kettridge et al., 2015). Содержание воды в верхних горизонтах торфяной залежи является одним из факторов, определяющих способность восстановления болотной растительности (Moore et al., 2017). Другим немаловажным фактором является увеличение зольности в верхнем слое торфа, которое может препятствовать росту сфагновых мхов из-за увеличения pH и минерализации субстрата (Marcotte et al., 2022). Пул органического углерода в торфяной залежи опосредованно проявляется в ряде показателей – степень разложения, зольность, плотность (Ефремова и др., 2016).

Вопрос постпирогенной динамики болот является наиболее изученным для сфагновых болот Канады (Benscoter et al., 2005; 2015; Benscoter, Vitt, 2008; Wieder et al., 2009; Thompson, Waddington, 2013). В России исследования пирогенно нарушенных торфяных почв сосредоточены в европейской части страны и, в основном, касаются оценок сильно нарушенных торфяных болот, используемых для добычи торфа или сельского хозяйства с низким уровнем болотных вод (Зайдельман, Романов, 2007; Вомперский и др., 2007). На болотах Западной Сибири исследования по оценке последствий пожара немногочисленны и касаются динамики растительности на осушенном участке Иксинского болота, выгоревшего в 1998 году (Базанов и др., 2002). В настоящее время на том же болоте проводится изучение процессов разложения остатков основных растений-торфообразователей в торфяной залежи (Головацкая и др., 2023).

Одним из основных вопросов в рамках исследований по оценке последствий природных пожаров на болотах является способность накопления углерода в результате постпирогенного восстановления компенсировать большие потери в ходе горения (Lukenbach et al., 2017). Необходима количественная оценка времени проявления реакции болотной экосистемы на пожар и траектории постпирогенной динамики пожаров (Ackley et al., 2021). Особенностью пожаров на болотах является высокая мозаичность выгорания, связанная с неоднородностью исходного микрорельефа поверхности. Поэтому оценка взаимодействий гидрологических условий, торфа и растительного покрова на выгоревших болотах с учетом неоднородности поверхности является одним из важных направлений в изучении постпирогенной динамики болотных экосистем.

Целью исследования является оценка трансформации водно-физических свойств торфяной залежи и интенсивности торфонакопления на постпирогенных участках осушенных верховых болот таёжной зоны Западной Сибири.

В рамках выполнения исследования поставлены следующие вопросы:

- 1) Насколько интенсивно происходит трансформация водно-физических свойств торфяной залежи после пожара и какова глубина ее трансформации на разных формах микрорельефа?
- 2) Каковы закономерности трансформации влажности верхних горизонтов торфяной залежи в зависимости от высоты микрорельефа, наличия горелого слоя, возраста гари и интенсивности осушения?
- 3) Возможно ли восстановление процесса торфонакопления до уровня невыгоревших болот на постпирогенных участках разного возраста?

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследования являются два ключевых участка, расположенные в пределах осушенных и выгоревших частей Бакчарского (56°52' с.ш., 82°41' в.д.) и Усть-Бакчарского (57°34' с.ш., 82°16' в.д.) болот. Бакчарское болото является северо-восточным отрогом Большого Васюганского болота; расположено в бассейне р. Чая (левый приток р. Обь) на междуречной равнине рек Бакчар и Икса. Болото было осушено в 1980 г. с целью лесомелиорации сетью открытых каналов. Несмотря на низкий эффект лесомелиорации, осушение болота стало причиной возникновения пожаров, наиболее значительные из которых произошли в начале 1990-х гг. и в 2016 г. Площадь распространения пожара в 2016 г. составила около 5 км². Полевые исследования проведены на 6 постпирогенных площадках и одной невыгоревшей (табл. 1, рис. 1).

Усть-Бакчарское болото расположено на террасе р. Бакчар. Болото было осушено для добычи торфа в 1980-х гг., но было брошено, и добыча в пределах ключевого участка не проводилась. Низкий уровень болотных вод стал причиной возникновения серии пожаров в разные годы, в результате которых выгорела практически вся осушенная часть болота. Последний крупный пожар произошел в 2014 г. на площади 0,5 км². Исследования проведены на 3 площадках, все из которых в разные годы были подвержены выгоранию и в настоящее время находятся на разных стадиях восстановления. Растительный покров обоих ключевых участков до пожара был представлен сосново-кустарничково-сфагновым фитоценозом. Мощность торфяной залежи изменяется в пределах 2,5–3,3 м. Более подробное описание объектов исследования представлено в работах (Синюткина и др., 2018; 2024; Sinyutkina, 2021).

Таблица 1

Характеристика объектов исследования

Площадки	Год пожара	Доля выгорания поверхности, %	Амплитуда колебаний высот, см	Уровень болотных вод, см
Бакчарское болото				
BF1	2016	93	32,8	-24
BF2	2016	67	42,5	-20
BF3	2016	71	38,0	-16
BF4	2016	97	33,8	-26
BF5	2016	74	34,7	-26
BF6	1990	нет данных	44,2	-28
Вфон	-	-	51,0	-15
Усть-Бакчарское болото				
UBF1	2014	99	28,5	-28
UBF2	2014	100	32,9	-29
UB	2000	нет данных	31,9	-40

Полевые исследования проведены в июле 2022 года. Для высотной привязки точек отбора проб к средней поверхности и сопоставления слоев торфяной залежи по глубине проведена тахеометрическая съемка на 9 площадках площадью 25 м² с шагом 50 см (121 точка на каждой площадке). На каждой точке определялось присутствие видов травяно-кустарничкового и мохово-лишайникового ярусов, присутствие и толщина горелого слоя. Отбор проб торфа проведен из двух скважин в понижении и повышении микрорельефа. Точки отбора выбирались визуально в местах с типичным для участка растительным покровом. Высоты скважин относительно средней поверхности изменялись в пределах -23 – -4 см в понижениях и 2–13 см на положительных формах. Шаг отбора составлял 5 см, глубина отбора 45–90 см. Таким образом, общее количество проб составило 297. Кроме того, на 4 площадках проведен отбор образцов торфа методом конверта в 9 точках в слое 0–30 см с шагом 10 см для лабораторного определения влажности. Оценка трансформации свойств торфа постпирогенных площадок пожара 2016 г. на Бакчарском болоте проведена в сравнении с невыгоревшей фоновой площадкой Вфон. На Усть-Бакчарском болоте, в связи с отсутствием негоревших участков в пределах осушенной части болота, сравнение свойств торфа постпирогенных площадок пожара 2014 г. проводилось с площадкой UB, принятой за условно фоновую.

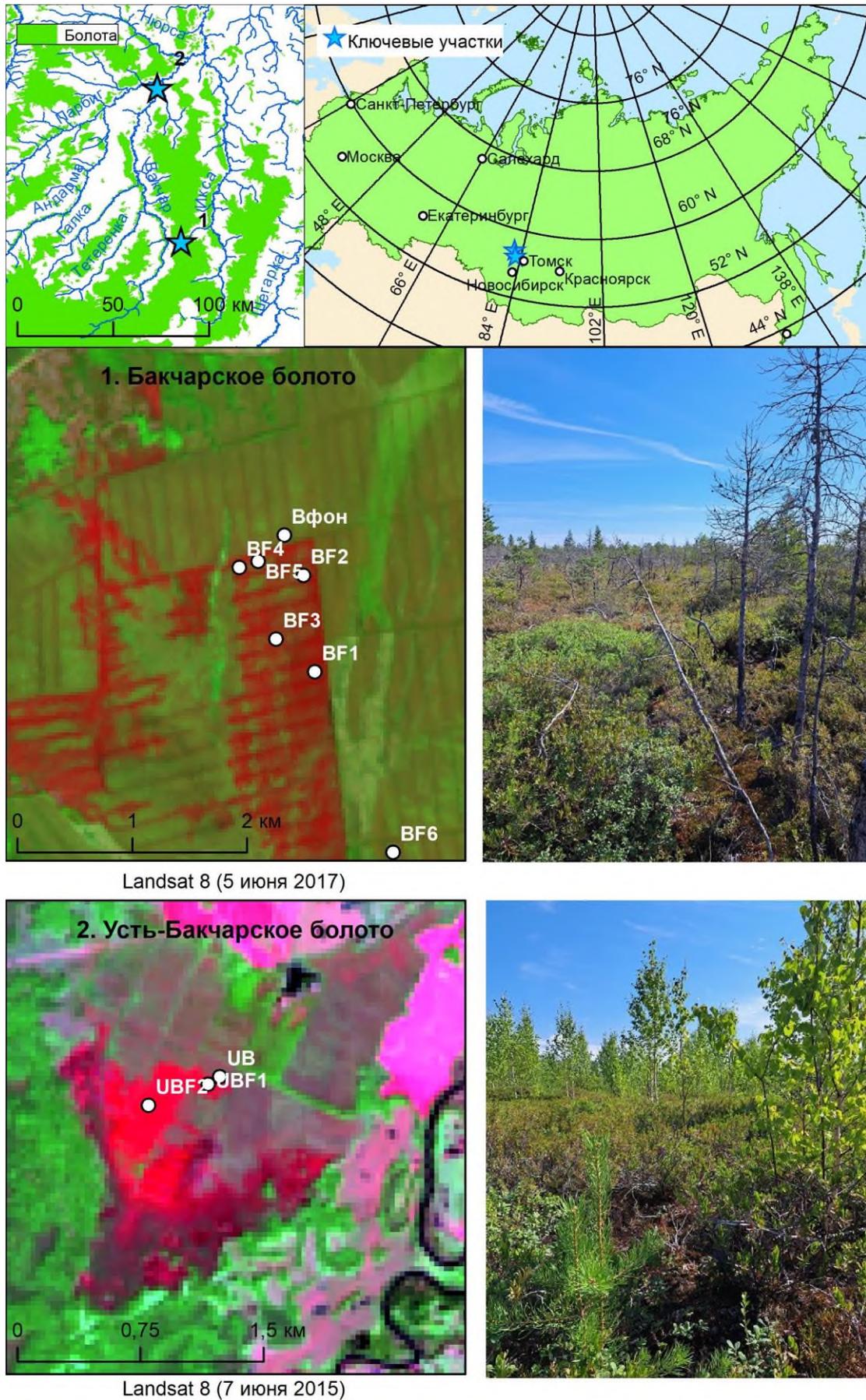


Рисунок 1. Схема расположения ключевых участков.

Лабораторное определение характеристик торфа проведено с использованием общепринятых методик: влажность (ГОСТ 11306-2013), зольность (ГОСТ 11306-2013), степень разложения и ботанический состав (ГОСТ 28245-89), степень гумификации и насыпная плотность торфа (Chambers et al., 2011).

Для расчета запасов углерода в торфяной залежи использовалась формула, предложенная О.В. Черновой и др. (2021) для определения углерода в подстилке, модифицированная для торфяной залежи:

$$C = \frac{100 - A}{100} * \frac{Kc}{100} * D * L * 10$$

где С – запас углерода, кг/м²;

А – зольность, %;

100–А – содержание органического вещества, %;

Кс – содержание углерода в органическом веществе, %;

D – насыпная плотность торфа, г/см³;

L – толщина слоя, см.

Содержание углерода в органическом веществе верхового торфа изменяется в пределах 53,4–61,3% между видами торфа, в частности, в сфагновых торфах оно составляет 53,4–54,2% (Тюрёмнов, 1976). Нами было принято усредненное значение для сфагновых торфов, составляющее 53,9%, что практически соответствует среднему значению (54,0%) содержания углерода в сфагновом торфе болота Московской области (Сирин и др., 2019) и чуть ниже усредненного значения для верхового торфа 55,5%, используемого в работе (Чернова и др., 2021) для расчета запасов углерода в торфяных болотных почвах в слое 30 см.

Кластерный анализ площадок проведен с использованием значений влажности, зольности, плотности, степени разложения и степени гумификации верхнего слоя и средних значений для слоя 0–45 см отдельно для положительных и отрицательных форм микрорельефа (20 показателей для каждой площадки).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Характеристика торфяной залежи. Торфяная залежь верхних горизонтов до глубины 90 см образована преимущественно сфагновыми торфами (282 из 297 образцов). В составе растительных остатков преобладает *Sphagnum fuscum* (139 образцов с долей *S. fuscum* более 90%, 68 образцов с примесью других сфагновых мхов, пушицы и древесных остатков); менее часто встречаются горизонты с преобладанием остатков *S. divinum* (46 образцов) и *S. balticum* (29 образцов). Редко встречаются горизонты с преобладанием древесных, травяных остатков и остатков зеленых мхов (15 образцов). Сравнение характеристик разных видов торфа (Kruskal-Wallis test, $p < 0,05$) не выявило значимых различий по всем рассматриваемым показателям, за исключением степени разложения, которая отличается между фускум и дивинум торфами и составляет 9 и 14% соответственно. Средняя толщина горелой прослойки через 6–8 лет после пожара не превышает 1 см.

Классификация площадок по свойствам торфяной залежи. По результатам кластерного анализа выделено два кластера, разделенных на 5 подкластеров (рис. 2). Первый кластер включает фоновую площадку Бакчарского болота, площадку пожара 2000 года на Усть-Бакчарском болоте (первый подкластер), практически полностью восстановившуюся площадку пожара 1990 г. ВФ6 и две постпирогенные площадки Бакчарского болота (ВФ2 и ВФ3 – второй подкластер), характеризующиеся частичным выгоранием поверхности (около 70%) и присутствием сохранившихся моховых подушек. Доля выгорания положительных форм составила 30% на обеих площадках, доля выгорания отрицательных форм и высот около средней поверхности составила 64–87%. Средняя толщина горелой прослойки через 6 лет после пожара составила 0,6 см. Площадки имеют одинаковую суммарную встречаемость сфагновых мхов – 0,37 с доминированием *S. fuscum* (встречаемость 0,27–0,32). Выгоревшие поверхности зарастают *Polytrichum strictum* со встречаемостью 0,32–0,66.

Второй кластер объединяет три подкластера. Первый из них включает всего одну площадку на Усть-Бакчарском болоте UBF1. Доля выгорания поверхности здесь составила 99%, толщина прослойки горелого торфа через 8 лет после пожара – 0,65 см. Площадка характеризуется полной деградацией моховой растительности, суммарная встречаемость сфагновых мхов составила всего 0,05 с доминированием *S. fuscum*, и интенсивным зарастанием *P. strictum*, встречаемость которого достигает 0,69.

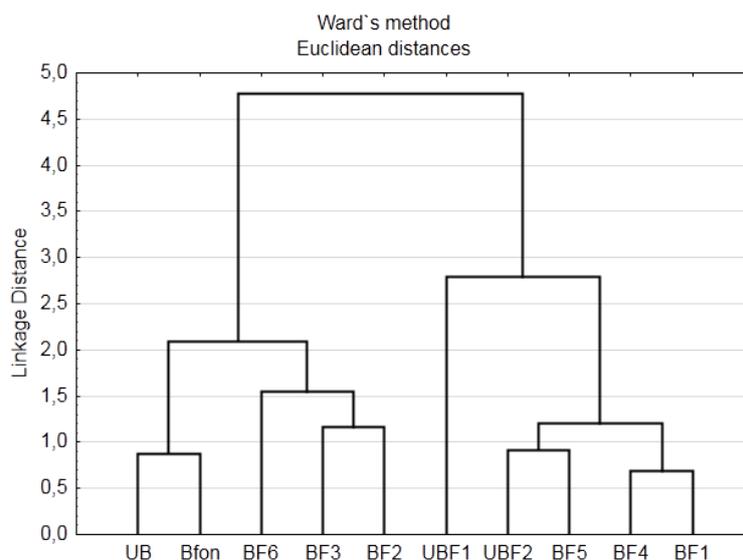


Рисунок 2. Дендрограмма кластерного анализа постпирогенных и невыгоревших площадок.

Второй подкластер включает площадки UBF2 и BF5. Площадки различаются по доле выгорания поверхности: полное выгорание на UBF2 и всего 76% на BF5, а также высокой долей выгорания понижений (87%) и широким распространением моховых подушек с погибшим сфагновым мхом. Суммарная встречаемость сфагновых мхов с доминированием *S. fuscum* составила 0,31, встречаемость *P. strictum* – 0,66. На площадке UBF2 сфагновые мхи практически полностью отсутствуют (встречаемость 0,01), кроме типичного зарастания *P. strictum* (0,69), здесь широкое распространение получили лишайники (0,54). Несмотря на различия в составе мохово-лишайникового яруса, общим для двух площадок являются высокие средние значения зольности в слое 0–45 см (около 4%), большая глубина трансформации торфяной залежи в понижениях и высокая степень гумификации верхнего слоя торфяной залежи на положительных формах (57–61%).

Третий подкластер включает две площадки Бакчарского болота – BF1 и BF4 с высокой долей выгорания поверхности (93–97%), толщиной горелого слоя 0,4–0,6 см, практически полным выгоранием понижений и высот около средней поверхности (95–100%). Общим для участков являются низкие значения глубины трансформации свойств торфа понижений, несмотря на высокую долю выгорания, высокую зольность верхнего слоя и большую глубину трансформации на положительных формах (до 30–35 см). Площадки отличаются по видовому составу мохового яруса. Встречаемость сфагновых мхов на BF1 составляет 0,41 с доминированием *S. fuscum* (0,33), площадка характеризуется высокой встречаемостью *P. strictum* – 0,83. На площадке BF4 встречаемость сфагновых мхов ниже – 0,14, встречаемость *P. strictum* – 0,64.

Различия свойств торфа между положительными и отрицательными формами на постпирогенных болотах. Наблюдаются различия в свойствах торфа между повышениями микрорельефа (моховыми подушками) и отрицательными формами. В слое 0–45 см на площадках Бакчарского болота средние значения плотности выше в понижениях в 1,10–1,17 раз в сравнении с обгоревшими моховыми подушками и в 1,23–1,45 раз выше в сравнении с сохранившимися моховыми подушками; значимые различия отмечены только на площадке BF2 (U-test, $p < 0,05$). На Усть-Бакчарском болоте различия не обнаружены. По степени разложения значимые различия не выявлены ни на одной из площадок, за исключением площадки BF6, где степень разложения на 7% выше в понижениях, в сравнении с моховыми подушками. Различия в степени разложения на участке пожара 1990 г. связаны с отсутствием аккумуляции торфа в понижениях на протяжении более, чем 30 лет после пожара, и, наоборот, на положительных формах интенсивным ростом сфагновых мхов с доминированием *S. fuscum* и аккумуляцией сфагнового торфа с низкой степенью разложения. Значимые различия степени гумификации отмечены на площадках BF3 и BF5, где значения оказались выше в 1,14–1,32 раза на положительных формах в сравнении с отрицательными; не существенное превышение в 1,1 раза отмечено на BF4. На остальных площадках различия не выявлены, за исключением UBF2, где степень гумификации в понижениях оказалась выше в 1,1 раза. Значимые различия в зольности выявлены только на фоновой площадке Бакчарского болота, где зольность понижений превышает повышения в 1,6 раз.

Наблюдаются различия в закономерностях изменения зольности по глубине между положительными и отрицательными формами. Например, на площадках BF2 и BF5 зольность в понижениях выше в 1,21–1,46 раз в сравнении с моховыми подушками за счет высоких значений зольности верхнего слоя 0–5 см (14,2–14,8%), а на площадках BF1, BF3 и BF4 она равна или даже выше на положительных формах за счет повышения зольности на глубине 15–30 см моховых подушек. На Усть-Бакчарском болоте зольность отрицательных форм в 1,52–1,57 раз выше в сравнении с положительными, за счет более интенсивного выгорания понижений и отсутствия миграции зольных элементов при низком уровне болотных вод. Значимые различия влажности между формами микрорельефа отмечены только на площадке UBF1, где влажность понижений оказалась на 2% выше в сравнении с повышениями. На всех остальных площадках влажность отрицательных форм на 0,5–1,5% выше в сравнении с моховыми подушками. Различия в характеристиках торфа между положительными и отрицательными формами прослеживаются до глубины 5–15 см ниже поверхности понижений и в большей степени проявляются во влажности и зольности (рис. 3, табл. 2).

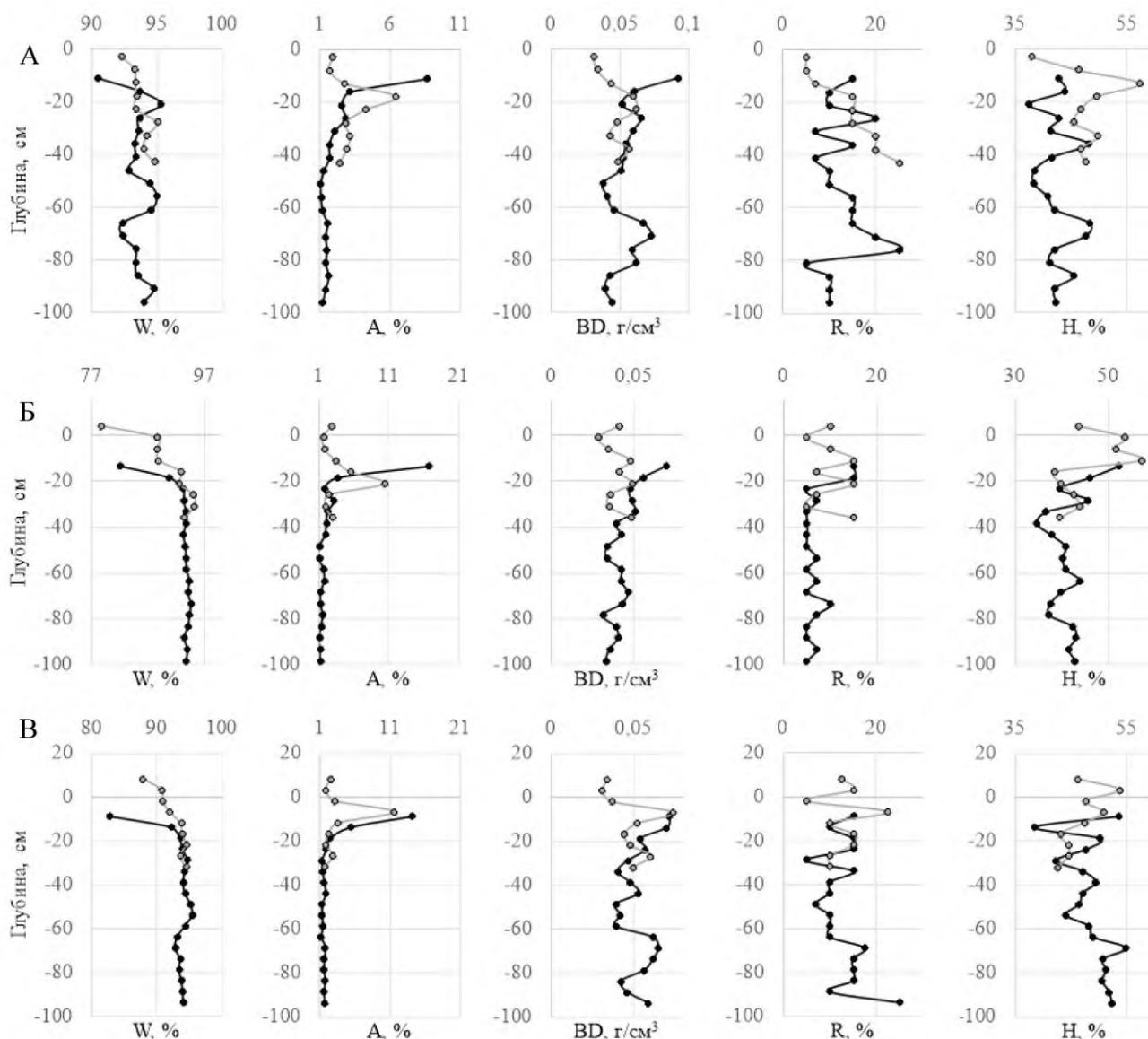


Рисунок 3. Свойства торфяной залежи площадок: А – BF3 с сохранившимся мхом на моховой подушке и горелым понижением; Б – BF4 с погибшим мхом на моховой подушке и горелым понижением; В – BF1 с горелыми моховой подушкой и понижением (W – влажность; А – зольность, BD – насыпная плотность; R – степень разложения; H – степень гумификации). Серая линия – положительные формы микрорельефа; черная линия – отрицательные формы микрорельефа. За 0 по оси Y принята средняя поверхность площадки.

Таблица 2

Средние значения свойств торфа по формам микрорельефа

Форма микрорельефа	Влажность, %		Зольность, %		Плотность, г/см ³		Степень разложения, %		Степень гумификации, %	
	0–5	0–45	0–5	0–45	0–5	0–45	0–5	0–45	0–5	0–45
Глубина, см	0–5	0–45	0–5	0–45	0–5	0–45	0–5	0–45	0–5	0–45
Сохранившиеся моховые подушки (BF2, BF3)	91,7	93,8	1,8	3,1	0,021	0,043	5	12	32,9	40,8
Моховые подушки с погибшим мхом (BF4, BF5)	81,7	90,5	2,9	3,2	0,047	0,042	10	10	52,2	49,4
Моховые подушки с горелым слоем (BF1, UBF1, UBF2)	84,8	91,3	3,5	2,6	0,054	0,048	14	11	53,1	43,5
Моховая подушка Вфон	90,7	91,1	1,7	1,8	0,015	0,025	5	11	25	42
Горелые понижения (все площадки)	85,3	92,4	12,0	3,5	0,075	0,053	14	11	48,1	42,3
Понижение Вфон	91,2	93,5	1,5	2,5	0,04	0,04	5	10	50	43

Пирогенная трансформация торфяной залежи. Наиболее сильные изменения свойств торфа в результате пожара характерны для поверхностного слоя 0–5 см. Среднее значение влажности верхнего слоя торфа выгоревших понижений составляет 85,3%, что на 6% ниже, в сравнении с фоновыми значениями. Более значимые различия характерны для зольности, значения которой увеличились с 1,5 до 8,6–14,8%. Отмечено уплотнение верхнего слоя, плотность увеличилась с 0,04 до 0,05–0,11 г/см³. Степень гумификации отличается между площадками, прослеживается прямая зависимость степени гумификации с долей выгоревшей поверхности. В сравнении с фоновыми площадками, в отдельных случаях степень гумификации была ниже фонового значения (33–43%) на участках с меньшей долей выгорания (BF2, BF3), на остальных выше на 2–7%. Таким образом, выгорание понижений привело к изменению всех рассматриваемых характеристик торфа; их изменчивость между площадками определяется долей выгорания (влажность, зольность, степень гумификации) и толщиной горелого слоя (плотность). Выгорание в наибольшей степени отразилось на зольности, значения которой увеличились в 1,5–9 раз в сравнении с фоновыми участками (см. табл. 2).

В понижениях трансформация свойств торфа наиболее выражена в верхнем слое, непосредственно подвергнутому горению, но различия значений между фоновыми и пирогенными участками достигают глубины 10–15 см (табл. 3). Наибольшая глубина проявления различий характерна для зольности, что может происходить за счет просачивания зольных элементов вглубь торфяной залежи и частичной трансформации органического вещества под воздействием высоких температур вне зоны горения. На Бакчарском болоте увеличение зольности прослеживается до глубины 15 см. В слое 5–10 см зольность постпирогенных площадок в 2–3 раза выше в сравнении с фоновой. На Усть-Бакчарском болоте повышение зольности ограничивается глубиной 10 см, а превышение значений в слое 5–10 см в сравнении с условно фоновой площадкой составляет 1,1–1,7 раз. На отдельных площадках Бакчарского болота (BF1, BF4, BF5) уплотнение торфяной залежи прослеживается до глубины 15 см, где значения плотности превышают фоновые в 1,4–1,6 раз в слое 5–15 см. На Усть-Бакчарском болоте увеличение плотности не выявлено. Увеличение степени гумификации отмечено на площадке UBF2 на 7% в сравнении с UB. Закономерности изменения влажности не выявлены между постпирогенными и фоновыми площадками в связи с высокой динамичностью значений в зависимости от количества осадков в разные дни отбора. Таким образом, максимальная глубина трансформации торфяной залежи в понижениях составила 15 см, а наибольшие различия в сравнении с фоном оказались характерными для зольности.

Значимые различия (U-test, $p < 0,05$) в слое 0–45 см между отрицательными формами постпирогенных, фоновой и условно фоновой площадками наиболее часто проявляются для степени гумификации и плотности на обоих болотах, а по степени разложения – на Усть-Бакчарском болоте.

Таблица 3

Глубина проявления трансформации свойств торфяной залежи отрицательных (-) и положительных (+) форм микрорельефа в сравнении с фоновыми участками, см

Площадка	Влажность		Зольность		Плотность		Степень гумификации	
	-	+	-	+	-	+	-	+
BF1	5	-	15	25	15	35	5	25
BF2	-	-	10	25	5	-	-	-
BF3	-	40	15	35	5	30	5	30
BF4	5	20	10	30	15	30	10	20
BF5	15	20	15	30	15	35	5	25
UBF1	-	5	10	10	-	10	-	10
UBF2	-	10	10	10	5	10	10	10

На положительных формах микрорельефа интенсивность трансформации свойств торфяной залежи верхнего слоя (0–5 см) изменяется в ряду: фоновая площадка – сохранившиеся моховые подушки на пирогенных площадках – моховые подушки с погибшим сфагновым мхом – моховые подушки с горелым верхним слоем. В данном ряду происходит увеличение зольности верхнего слоя с 1,5 до 3,5%, степени гумификации с 30 до 53%, степени разложения с 4 до 15% и уменьшение влажности с 92 до 82%. Показатели сохранившихся моховых подушек постпирогенных площадок не отличаются по степени разложения, степени гумификации и влажности относительно фоновых, однако отмечено увеличение зольности с 1,5 до 1,8–2,0% и плотности с 0,015 до 0,021–0,025 г/см³. Более значимыми различиями характеризуются положительные формы с погибшим сфагновым мхом и горелым слоем. Здесь наблюдаются некоторые различия с фоновыми значениями, проявляющиеся в увеличении зольности в 1,2 раза, плотности в 1,15 раз, степени разложения в 1,4 раза. Таким образом, влияние пожара практически не распространяется на верхний слой сохранившихся моховых подушек; трансформация свойств обгоревших моховых подушек незначительна и проявляется не по всем показателям.

Глубина трансформации свойств торфяной залежи положительных форм на площадках Бакчарского болота оказалась больше в сравнении с понижениями (см. табл. 3). Трансформация свойств отмечена даже на невыгоревших моховых подушках пирогенных участков и проявляется в увеличении зольности в слое 25–35 см в сравнении с выше- и нижележащими слоями. На нарушенных моховых подушках отмечены изменения по всем рассматриваемым показателям. Наблюдается увеличение степени гумификации на 6–16%, плотности в 1,6–2 раза, зольности в 2,2–3,2 раза, степени разложения на 5–10% и уменьшение влажности на 3–4% в сравнении с фоновыми значениями. Значимые различия (U-test, $p < 0,05$) в слое 0–45 см между положительными формами постпирогенных и фоновыми площадками наиболее часто проявляются для зольности (3 из 5 площадок), а ниже – по всем остальным показателям (2 из 5 площадок).

На всех постпирогенных площадках Бакчарского болота в торфяной залежи положительных форм выделяется слой с повышением зольности в 1,8–2,6 раза относительно выше- и нижележащих слоев, не связанный со сменой ботанического состава. Глубина расположения слоя меняется между площадками в пределах 15–30 см и соответствует высоте поверхности понижений, отличающихся большей степенью выгорания и высокой зольностью верхнего горелого горизонта. Повышение зольности, вероятно, связано с миграцией зольных элементов из горелых понижений по всей поверхности болота, захватывая, в том числе, и моховые подушки, не подверженные выгоранию. На Усть-Бакчарском болоте данная закономерность не наблюдается, что вероятно связано с более низким многолетним уровнем болотных вод и, поэтому, отсутствием горизонтальной миграции зольных элементов в приповерхностных слоях торфяной залежи.

Положительные формы постпирогенных площадок на Усть-Бакчарском болоте отличаются меньшей глубиной трансформации свойств торфа, которая составляет всего 5–10 см (см. табл. 3). Наблюдается увеличение зольности в 1,6–2,5 раза, плотности в 2,3–2,4 раза, степени гумификации на 17%, степени разложения на 5–10% и уменьшение влажности на 4–7% в сравнении с условно фоновой площадкой. Значимые различия (U-test, $p < 0,05$) на Усть-Бакчарском болоте в слое 0–45 см не выявлены ни по одному из показателей, что объясняется исходной большей трансформацией Усть-Бакчарского болота – повышенным осушением и периодически возникающими пожарами.

Пространственная неоднородность влажности торфа в слое 0–30 см. На Бакчарском болоте средние значения влажности по 9 точкам отбора в слое 0–30 см не различаются между постпирогенной и фоновой площадками и составляют 91,2%. При этом наблюдаются различия в распределении значений влажности по формам микрорельефа и по глубине. Площадка BF5 характеризуется низкой влажностью в понижениях, ростом значений у средней поверхности и снижением влажности на положительных формах (рис. 4). Снижение влажности в понижениях объясняется отсутствием капиллярного поднятия влаги на участках с разреженным моховым покровом или полным его отсутствием и наблюдается также на осушенных невыгоревших участках Бакчарского болота. Но здесь, в отличие от постпирогенных болот, положительные формы характеризуются высокими значениями влажности, снижение которой происходит только на самых высоких моховых подушках (Sinyutkina, 2021). Распределение значений влажности на площадке BF6 является схожим с невыгоревшими участками Бакчарского болота, что объясняется практически полным восстановлением исходной растительности.

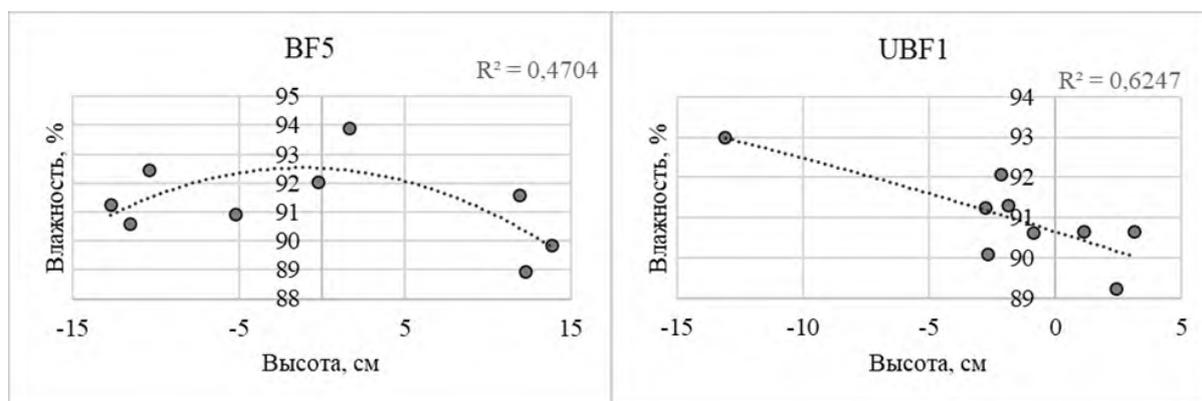


Рисунок 4. Средняя влажность в слое 0–30 на постпирогенных площадках в зависимости от высоты поверхности.

В пределах площадки BF5 наблюдаются различия между выгоревшими и сохранившимися точками. На невыгоревших точках отбора в слое 0–30 см отмечена однородность влажности по глубине, различия не превышают 2%. На аналогичных высотах микрорельефа влажность выше на невыгоревших точках в сравнении с выгоревшими на 1% на повышениях и на 2% на высотах около средней поверхности. Выгоревшие точки характеризуются обсыханием слоя 0–10 см до 85–87% и увеличением влажности в слое 20–30 см в среднем на 5%.

На Усть-Бакчарском болоте средняя влажность торфа в слое 0–30 см составляет 90% на площадке UB и 91% на площадке UBF1. Более высокая средняя влажность на площадке UBF1 объясняется отсутствием моховых подушек, которые единично присутствуют на площадке UB и отличаются низкой влажностью (87%). Влажность верхнего слоя 0–10 см на высотах около средней поверхности составляет 87,2% на постпирогенной площадке и 88,6% на условно фоновой. На площадке UBF1 происходит снижение влажности от отрицательных форм к положительным в среднем от 91,1 до 89,2%. На всех точках отбора в пределах площадок отмечены более низкие значения влажности в слое 0–10 см в сравнении со слоем 20–30 см в среднем на 5,7% на площадке UBF1 и 3,9% на площадке UB. Схожие значения влажности и закономерности их распределения между площадками объясняются выровненным микрорельефом и практически полным отсутствием сфагновых мхов, даже более чем через 20 лет после пожара (Синюткина, Гашкова, 2023).

Аккумуляция торфа на постпирогенных болотах. На площадках, выгоревших в 2016 г. на Бакчарском болоте и в 2014 г. на Усть-Бакчарском болоте, через 6–8 лет после пожара отмечено только частичное зарастание сфагновыми мхами, аккумуляция торфа еще не началась. Поэтому оценка накопления углерода после пожара проведена только для площадок старых пожаров 1990 и 2000 гг. На Бакчарском болоте (BF6) отмечены существенные различия в интенсивности накопления торфа между формами микрорельефа. Вероятно, во время пожара здесь также большей трансформации залежи оказались подвержены понижения микрорельефа. В настоящее время в понижениях сфагновые мхи продолжают отсутствовать и, как следствие, накопление сфагнового торфа здесь не происходит. Верхние слои торфа образованы древесными остатками (слой 5–10 см), выпавшими сюда на нижележащий слой фускум торфа во время пожара, и остатками *P. strictum* и

печеных мхов (слой 0–5 см). На моховых подушках, напротив, идет интенсивная аккумуляция сфагнового торфа. Глубина залегания горелого слоя на моховой подушке составляет 35 см. Несмотря на некоторую трансформацию горелой прослойки, слой хорошо выделяется по смене ботанического состава (*S. fuscum* на *P. strictum*), увеличению зольности до 3,8% и плотности до 0,064 г/см³ (рис. 5). Выше расположен слой сфагнового торфа с низкой степенью разложения (3–5%) и плотностью (0,023 г/см³). Скорость аккумуляции торфа на положительных формах в период после пожара 1990 г. составила около 1 см/год, а запас углерода в 35 см слое оценивается в 4,64 кг С/м². С учетом неоднородности поверхности, среднее накопление углерода после пожара за период 1990–2022 гг. составляет 1,9 кг С/м² или около 0,06 кг С/м² в год.

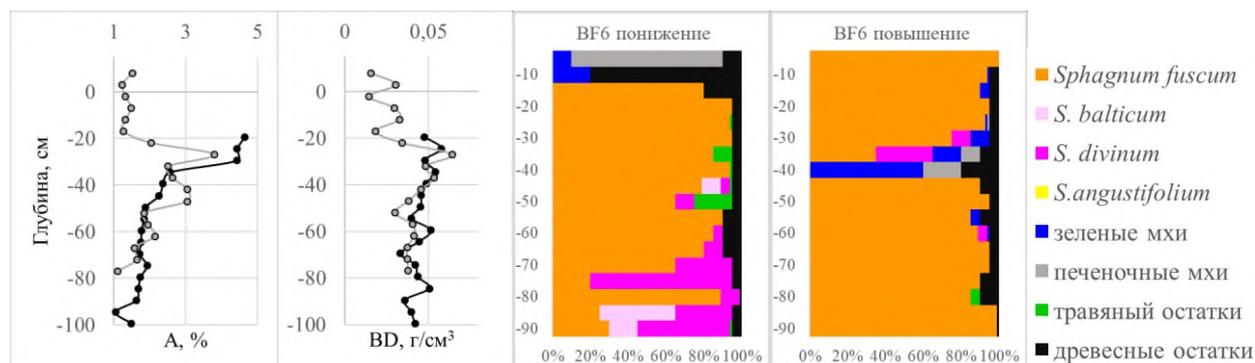


Рисунок 5. Ботанический состав, зольность и плотность торфяной залежи на площадке BF6 (пожар 1990 г. на Бакчарском болоте). Условные обозначения см. рис. 3.

На Усть-Бакчарском болоте зарастание сфагновыми мхами и накопление торфа идет медленней в сравнении с Бакчарским болотом. В понижениях здесь также отсутствуют сфагновые мхи, а накопление торфа происходит только отдельными пятнами на положительных формах. Горелый слой выявлен на глубине 10–15 см, для него характерно увеличение зольности до 5,3% и плотности до 0,07 г/см³, увеличение доли древесных остатков (рис. 6). Над этим слоем расположен слой сфагнового торфа с низкой зольностью (1,7%) и плотностью (0,025 г/см³). Скорость накопления торфа на положительной форме составила около 0,6 см/год, а запас углерода в данной точке отбора оценивается в 1,3 кг С/м². В связи с низкой встречаемостью сфагновых мхов (15%) и отсутствием аккумуляции торфа на большей части поверхности, среднее накопление углерода на данной площадке оценивается примерно в 0,10–0,20 кг С/м² в период 2000–2022 гг. или около 0,007 кг С/м² в год.

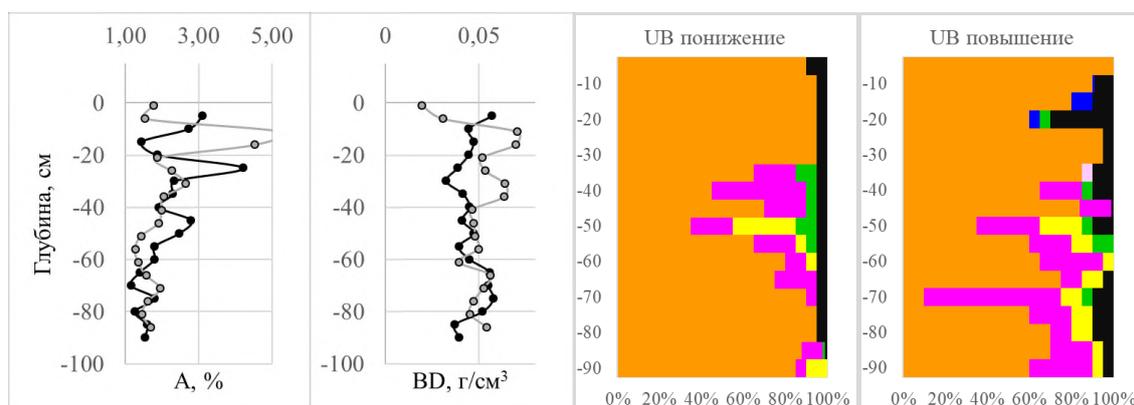


Рисунок 6. Ботанический состав, зольность и плотность торфяной залежи на площадке UB (пожар 2000 г. на Усть-Бакчарском болоте). Условные обозначения см. рис. 3, ботанический состав см. рис. 5.

ОБСУЖДЕНИЕ

Неоднородность поверхности болот влияет на степень выгорания, интенсивность трансформации торфяной залежи и, как следствие, на скорость аккумуляции органического вещества после пожара. Неоднородность выгорания по-разному проявляется на разных болотах в зависимости

от степени осушения, уровня болотных вод, генезиса положительных форм микрорельефа. Например, в результате исследования С.Э. Вомперского (2007) на верховом осушенном болоте в Тверской области показано, что выгоранию были больше подвержены положительные формы микрорельефа – пушицевые кочки и приствольные повышения, вследствие низкой влажности и наличия воздушных полостей, создающих дополнительную тягу во время горения. Сфагновые понижения, характеризующиеся большей влажностью, поражались огнем значительно реже, либо с меньшей силой. В условиях относительно высокого обводнения болота, интенсивность горения больше в понижениях микрорельефа, в то время как положительные формы менее подвержены выгоранию и часто остаются нетронутыми огнем, как это было отмечено на сфагновых болотах в Канаде (Thompson, Waddington, 2013; Benschoter et al., 2015). По результатам нашего исследования, эта закономерность была отмечена на верховом Бакчарском болоте (Синюткина и др., 2024).

Невысокая теплотворная способность торфа, большая влажность и капиллярный подток влаги ограничивают распространения огня вглубь (Вомперский и др., 2007). На объектах нашего исследования непосредственному горению были подвержены только верхние сантиметры торфяной залежи, тем не менее, косвенное влияние пожара прослеживается и в нижележащих слоях залежи до глубины 35 см. Это влияние проявляется в увеличении зольности за счет просачивания и растекания зольных элементов из горелого слоя, некотором уплотнении торфа из-за просадки залежи в связи со снижением влажности при деградации покрова из сфагновых мхов.

Средняя скорость накопления торфа в голоцене в Западной Сибири колеблется от $0,35 \pm 0,03$ до $1,13 \pm 0,02$ мм/год (Vorren et al., 2004). В поверхностном слое на невыгоревших естественных болотах скорость накопления торфа значительно выше и может достигать нескольких см в год (Holden, Burt, 2003; Taminskas et al., 2018). Пожары приводят к утрате части торфяной залежи во время горения, а трансформация структуры растительного покрова становится причиной прекращения процесса торфообразования на некоторый срок после пожара, что снижает среднюю скорость торфообразования за длительный период (Цыганов и др., 2018). Например, потери углерода в результате пожара на осушенном верховом болоте в Тверской области оцениваются в $0,43\text{--}2,87$ кг С/м², в частности, при расстоянии между каналами 160 м (наиболее схожие условия с ключевым участком на Бакчарском болоте) – $0,83 \pm 0,62$ кг С/м². В исследовании (Wieder et al., 2009) отмечено, что примерно через 13 лет после пожара возможен переход болота от источника углерода к его поглотителю. В результате нашего исследования выявлены существенные различия срока восстановления функции накопления углерода как между болотами с разной интенсивностью осушения, так и между формами микрорельефа в пределах одного болота. Скорость аккумуляции торфа на положительных формах постпирогенного участка, составляющая около 1 см/год, оказалась выше или равна значениям, характерным для других болот таежной зоны Западной Сибири: например, $0,1\text{--}2,0$ см/год на осушенных верховых сосново-кустарничково-сфагновых болотах Томской области в период после осушения (Sinyutkina, 2021); $0,35$ см/год в слое 0–50 см на грядово-мочажинном участке Бакчарского болота (Веретенникова, 2015); $0,24\text{--}1,1$ см/год на осушенных и естественных болотах за период 40–45 лет (Прейс и др., 2010). Скорость накопления органического вещества на положительных формах постпирогенного участка на Бакчарском болоте в период с 1990 по 2022 гг. оказалась сопоставима с данными, полученными для невыгоревшего осушенного участка с сосново-кустарничково-сфагновым фитоценозом в период после осушения, проведенного в 1980-х гг. (Sinyutkina, 2021). Тем не менее, средняя скорость накопления углерода ($0,06$ кг С/м²×год) оказалась ниже за счет отсутствия аккумуляции торфа в выгоревших понижениях в сравнении с невыгоревшими участками Бакчарского болота, где она составляет около $0,1$ кг С/м²×год. Скорость аккумуляции торфа и накопления органического вещества на постпирогенном участке на Усть-Бакчарском болоте оказалась ниже в сравнении с осушенными невыгоревшими участками сосново-кустарничково-сфагновых болот южно-таежной подзоны Западной Сибири, представленных в исследовании (Sinyutkina, 2021). Таким образом, предполагаемое время восстановления углеродного баланса на Бакчарском болоте составило около 15 лет; для восстановления запасов углерода на допожарный уровень на Усть-Бакчарском болоте потребуются сотни лет с учетом больших потерь углерода при пожаре и низкой скорости аккумуляции органического вещества даже при условии отсутствия пожаров в будущем.

ВЫВОДЫ

1. Большая трансформация свойств торфяной залежи характерна для понижений микрорельефа, где выгорание привело к изменению всех рассматриваемых характеристик поверхностного слоя торфа – влажности, зольности, плотности, степени разложения и степени гумификации. Выгорание в наибольшей степени отразилось на зольности, значения которой увеличились в 1,5–9 раз в сравнении с фоновыми участками. Трансформация свойств торфа наиболее выражена в верхнем слое (0–5 см), но различия значений между фоновыми и пирогенными участками в понижениях достигает глубины 10–15 см. На положительных формах микрорельефа интенсивность трансформации свойств верхнего слоя торфа оказалась менее значима в сравнении с понижениями, но здесь наблюдается большая глубина трансформации, достигающая 15–30 см.

2. Через 6–8 лет после пожара его последствия проявляются в обсыхании верхнего слоя торфяной залежи, что препятствует интенсивному зарастанию сфагновыми мхами. На участке лесомелиорации в пределах Бакчарского болота, более чем через 30 лет после пожара, отмечено восстановление растительного покрова, а влажность на разных формах микрорельефа имеет близкие значения к фоновым участкам. На Усть-Бакчарском болоте, в условиях постоянно низкого уровня болотных вод, восстановления растительного покрова из сфагновых мхов не происходит и влажность практически не отличается между площадками, выгоревшими 8 и более чем 20 лет назад.

3. Интенсивность торфообразования на постпирогенных участках имеет большие различия как на уровне микрорельефа в пределах одной площадки, так и между болотными массивами. Восстановление процесса аккумуляции органического вещества, по скорости сопоставимого с невыгоревшими участками верховых болот таежной зоны, отмечено на положительных формах участка Бакчарского болота, выгоревшего в 1990 г., в то время как в понижениях аккумуляция торфа отсутствует. На участке Усть-Бакчарского болота, более чем через 20 лет после пожара, скорость накопления органического вещества ниже в 8,5 раз в сравнении с Бакчарским болотом, что связано с практически полной деградацией сфагновых мхов в результате постоянного низкого уровня болотных вод.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Исследование выполнено за счет гранта РФФИ (проект № 22-77-10024).

ЛИТЕРАТУРА

Базанов В.А., Егоров Б.А., Льготин В.А., Скугарев А.А. Современная пространственная динамика Большого Васюганского болота (на примере междуречья рек Икса-Шегарка) // Большое Васюганское болото. Современное состояние и процессы развития. Под редакцией М.В. Кабанова. Томск: Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2002. С. 190–196.

Вомперский С.Э., Глухова Т.В., Смагина М.В., Ковалев А.Г. Условия и последствия пожаров в сосняках на осушенных болотах // Лесоведение. 2007. № 6. С. 35–44.

Глухова Т.В., Сирин А.А. Потери почвенного углерода при пожаре на осушенном лесном верховом болоте // Почвоведение. 2018. № 5. С. 580–588. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0032180X18050076>.

Головацкая Е.А., Никонова Л.Г., Калашникова Д.А., Симонова Г.В. Изменение изотопного состава азота в процессе трансформации опада растений-торфообразователей на осушенных и постпирогенных участках олиготрофных болот // Почвы и окружающая среда. 2023. Том 6. № 4. e238. DOI: <https://doi.org/10.31251/pos.v6i4.238>.

ГОСТ 28245-89. Торф. Методы определения ботанического состава и степени разложения. Москва: Издательство стандартов, 1989. 6 с.

ГОСТ 11306-2013. Торф и продукты его переработки. Методы определения зольности. Москва: Стандартинформ, 2014. 5 с.

Ефремова Т.Т., Аврова А.Ф., Ефремов С.П. Расчетный метод определения углерода в торфах и моховых подстилках лесных болот по зольности растительного субстрата // Сибирский лесной журнал. 2016. № 6. С. 73–83. DOI: <https://doi.org/10.15372/SJFS20160607>.

Ефремова Т.Т., Пименов А.В., Ефремов С.П., Аврова А.Ф. Лесные пирогенные торфяные почвы и глееземы заболоченных горных долин юга Енисейской Сибири // Почвоведение. 2021. № 7. С. 771–782. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0032180X21070030>.

- Зайдельман Ф.Р., Романов С.В. Эколого-гидротермическая оценка пирогенно-измененных и дерново-пирогенных почв выработанных торфяных месторождений // Почвоведение. 2007. № 1. С. 93–105.
- Копотева Т.А., Купцова В.А. Влияние пожаров на функционирование фитоценозов торфяных болот Среднеаурской низменности // Экология. 2016. № 1. С. 14–21. DOI: <https://doi.org/10.7868/S03670959715060086>.
- Малашук А.А., Филиппов Д.А. Постпирогенная динамика растительного покрова верхового болота Барское (Вологодская область) // Трансформация экосистем. 2021. Том 4. № 1. С. 104–121. DOI: <https://doi.org/10.23859/estr-200512>.
- Прейс Ю.И., Сороковенко О.Р., Бобров В.А. Современная аккумуляция торфа в рямах олиготрофных болот юга лесной зоны Западной Сибири как отклик на изменения климата // Вестник Томского государственного университета. 2010. № 333. С. 187–194.
- Синюткина А.А., Гашкова Л.П. Пространственная неоднородность влажности торфа осушенных и выгоревших верховых болот в пределах подзоны южной тайги Западной Сибири // Почвы и окружающая среда [Электронный ресурс]: Сборник научных трудов Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 55-летию Института почвоведения и агрохимии СО РАН (Новосибирск, 2–6 октября 2023 г.). Новосибирск: ИПА СО РАН, 2023. С. 482–485. DOI: <https://doi.org/10.31251/conf1-2023>.
- Синюткина А.А., Гашкова Л.П., Малолетко А.А., Магур М.Г., Харанжевская Ю.А. Трансформация поверхности и растительного покрова осушенных верховых болот юго-востока Западной Сибири // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2018. № 43. С. 196–223. DOI: <https://doi.org/10.17223/19988591/43/10>.
- Синюткина А.А., Гашкова Л.П., Харанжевская Ю.А. Пирогенное изменение болотной растительности и торфа в Западной Сибири // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2024. № 1. С. 78–88. DOI: <https://doi.org/10.55959/MSU0579-9414.5.79.1.6>.
- Сирин А.А., Макаров Д.А., Гуммерт И., Маслов А.А., Гульбе Я.И. Глубина прогорания торфа и потери углерода при лесном подземном пожаре // Лесоведение. 2019. № 5. С. 410–422. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0024114819050097>.
- Тюремнов С.Н. Торфяные месторождения. Москва: Недра, 1976. 488 с.
- Цыганов А.Н., Новенко Е.Ю., Бабешко К.В., Мазей Н.Г., Борисова Т.В., Мазей Ю.А. Послепожарная сукцессия болотных экосистем по данным палеоэкологического анализа на примере болота Новоалександровское (Мещерская низменность, Рязанская область) // Известия Российской академии наук. Серия биологическая. 2018. № 5. С. 573–580. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0002332918050156>.
- 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. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0032180X21030047>.
- Ackley C., Tank S.E., Haynes K. M., Rezanezhad F., McCarter C., Quintona W.L. Coupled hydrological and geochemical impacts of wildfire in peatland-dominated regions of discontinuous permafrost // Science of the Total Environment. 2021. No. 782. 146841. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146841>.
- Benscoter B.W., Greenacre D., Turetsky M.R. Wildfire as a key determinant of peatland microtopography // Canadian Journal of Forest Research. 2015. No. 45. P. 1133–1137. DOI: <https://doi.org/10.1139/cjfr-2015-0028>.
- Benscoter B.W., Vitt D.H. Spatial patterns and temporal trajectories of the bog ground layer along a post-fire chronosequence // Ecosystems. 2008. No. 11. P. 1054–1064. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10021-008-9178-4>.
- Benscoter B.W., Vitt D.H., Wieder R.K. Association of postfire peat accumulation and microtopography in boreal bogs // Canadian Journal of Forest Research. 2005. No. 35. P. 2188–2193.
- Borren W., Bleuten W., Lapshina E.D. Holocene peat and carbon accumulation rates in the southern taiga of western Siberia // Quaternary Research. 2004. No. 61. P. 42–51. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2003.09.002>.
- Chambers F.M., Beilman D.W., Yu. Z. Methods for determining peat humification and for quantifying peat bulk density, organic matter and carbon content for palaeoecological studies of climate and peatland carbon dynamic // Mires and Peat. 2011. Vol. 7. Article 07. P. 1–10.
- Feurdean A., Florescu G., Tantau I., Vanniere B., Diaconu A.-C., Pfeiffer M., Warren D., Hutchinson S.M., Gorina N., Galka M., Kirpotin S. Recent fire regime in the southern boreal forests of western Siberia is unprecedented in the last five millennia // Quaternary Science Reviews. 2020. No. 244. 106495. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2020.106495>.
- Holden J., Burt T.P. Hydrological studies on blanket peat: the significance of the acrotelm-catotelm model // Journal of Ecology. 2003. No. 91. P. 86–102. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1365-2745.2003.00748.x>.

- Kettridge N., Turetsky M., Sherwood J., Thompson D.K., Moller C.A., Benscoter B.W., Flannigan M.D., Wotton B.M., Waddington J.M. Moderate drop in water table increases peatland vulnerability to post-fire regime shift // Scientific Reports. 2015. No. 5. 8063. DOI: <https://doi.org/10.1038/srep08063>.
- Lin S., Liu Ya., Huang X. Climate-induced Arctic-boreal peatland fire and carbon loss in the 21st century // Science of the Total Environment. 2021. No. 796. 148924. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148924>.
- Lukenbach M.C., Hokanson K.J., Devito K.J., Kettridge N., Petrone R.M., Mendoza C.A., Granath G., Waddington J.M. Post-fire ecohydrological conditions at peatland margins in different hydrogeological settings of the Boreal Plain // Journal of Hydrology. 2017. No. 548. P. 741–753. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.03.034>.
- Marcotte A.L., Limpens J., Stoof C.R., Stoorvogel J.J. Can ash from smoldering fires increase peatland soil pH? // International Journal of Wildland Fire. 2022. No. 31. P. 607–620. DOI: <https://doi.org/10.1071/WF21150>.
- Moore P.A., Lukenbach M.C., Kettridge N., Petrone R.M., Devito K.J., Waddington J.M. Peatland water repellency: Importance of soil water content, moss species, and burn severity // Journal of Hydrology. 2017. No. 554. P. 656–665. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.09.036>.
- Sinyutkina A. Drainage consequences and self-restoration of drained raised bogs in the south-eastern part of Western Siberia: Peat accumulation and vegetation dynamics // Catena. 2021. No. 205. 105464. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105464>.
- Taminskas J., Linkeviciene R., Simanaukiene R., Jukna L., Kibirskis G., Tamkeviciute M. Climate change and water table fluctuation: Implications for raised bog surface variability // Geomorphology. 2018. No. 304. P. 40–49. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.12.026>.
- Thompson D.K., Waddington J.M. Wildfire effects on vadose zone hydrology in forested boreal peatland microforms // Journal of Hydrology. 2013. No. 486. P. 48–56. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.01.014>.
- Wieder R.K., Scott K., Kamminga K., Vile M.A., Vitt D.H., Bone T., Xu B., Benscoter B.W., Bhatti J.A. Postfire carbon balance in boreal bogs of Alberta, Canada // Global Change Biology. 2009. No. 15. P. 63–81. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01756.x>.

Поступила в редакцию 18.01.2024

Принята 13.03.2024

Опубликована 18.03.2024

Сведения об авторах:

Синюткина Анна Алексеевна – кандидат географических наук, старший научный сотрудник, Сибирский научно-исследовательский институт сельского хозяйства и торфа – филиал Сибирского федерального научного центра агробиотехнологий РАН, научный отдел (г. Томск, Россия); ankalaeva@yandex.ru

Оленникова Арина Владимировна – младший научный сотрудник, Сибирский научно-исследовательский институт сельского хозяйства и торфа – филиал Сибирского федерального научного центра агробиотехнологий РАН, научный отдел (г. Томск, Россия); olennikovaarin@yandex.ru

Сун-зу-ли Людмила Юрьевна – младший научный сотрудник, Сибирский научно-исследовательский институт сельского хозяйства и торфа – филиал Сибирского федерального научного центра агробиотехнологий РАН, научный отдел (г. Томск, Россия); lyuda.sunzuli@mail.ru

Гашкова Людмила Павловна – кандидат географических наук, старший научный сотрудник, Сибирский научно-исследовательский институт сельского хозяйства и торфа – филиал Сибирского федерального научного центра агробиотехнологий РАН, научный отдел (г. Томск, Россия); gashkova-lp@rambler.ru

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.



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

Transformation of peat deposits and carbon accumulation in post-pyrogenic fens in the taiga zone of West Siberia

© 2024 A. A. Sinyutkina, , O. V. Olennikova, , L. Yu. Sun-zu-li, , L. P. Gashkova 

Siberian Federal Scientific Centre of Agro-Bio Technologies of the Russian Academy of Sciences, Siberian Research Institute of Agriculture and Peat, Gagarina st. 3, Tomsk, Russia. E-mail: ankalaeva@yandex.ru

The aim of the study was to assess of the transformation of the hydrologic and physical properties of peat deposits and peat accumulation rates in the post-pyrogenic sites of drained fens in the taiga zone of West Siberia.

Location and time of the study. Field studies were conducted in 2022 on the Bakchar fen (drained for forestry, seven plots) and Ust-Bakchar fen (drained for peat extraction, three plots) located in the Tomsk region.

Methods. Peat sampling was carried out from two boreholes at each plot in the hollow and the hummock. The sampling increment was 5 cm; the total depth was 45–90 cm. Peat samples were taken at nine subsites by the envelope method on each plot in 0–30 cm layer by 10 cm increment for water content determination in laboratory. Laboratory study of peat characteristics was carried out using the following methods: water and ash content measurements (GOST 11306-2013, GOST 11306-2013), estimation of peat decomposition and humification degree, botanical composition (GOST 28245-89), as well as measuring peat bulk density. Carbon stocks in the upper layer of peat deposits was estimated using the values of peat ash content and density.

Results. The peat deposit of the upper layers was formed mainly by sphagnum peat with *Sphagnum fuscum* plant residues predominating. The differences between hollows and hummocks in their peat properties were manifested to a depth of 5–15 cm from the surface of depressions. The burnout of the hollows led to the changes of all peat properties to a depth of 10–15 cm: the changes were more pronounced in ash content, which was 1.5–9 times higher in the 0–5 cm layer as compared with the unburned site. The changes in peat properties on positive relief forms, i.e. moss hummocks, was less evident in the upper 0–5 cm layer, but reached a greater depth of 30 cm. The change was revealed mainly as an increase in peat ash content due to the migration of ash elements from the surface of burnt hollows and as an increase in bulk density due to subsidence of moss hummocks with the died-off sphagnum moss. Although the average water content in postpyrogenic and unburned sites was the same, amounting to 90–91% in the 0–30 cm layer, some difference was observed between the microrelief forms. The post-pyrogenic site in the Bakchar fen was characterized by water content decrease in hollows and hummocks, the maximum values being observed at an altitude near the average surface. In the Ust-Bakchar fen, water content was found to decrease from hollows to hummocks. In the Bakchar fen, 30 years after the fire peat accumulation occurred only on positive microrelief forms, where the 35 cm thick layer formed after the fire. Taking into account the microrelief heterogeneity, carbon accumulation over the post-fire period was estimated as 1.9 kg C/m² or 60 g C/m² per year. Peat accumulation seemed much slower in the Ust-Bakchar fen and was apparently absent on most of the surface. The average rate was estimated as 7 g C/m² per year.

Conclusions. The study found fen hollows to be most prone to burnout. The consequences of the fire manifest themselves in the drying of the upper layer of the peat deposit, thus preventing intensive overgrowth by sphagnum mosses 6–8 years after the fire. At the drained for forestry site in the Bakchar fen, 30 years after the fire the peat accumulation rate on moss hummocks was comparable to the rate in the unburned areas.

Keywords: peat soil; microtopography; wildfire; water content; ash content, degree of decomposition; degree of humification; peat bulk density.

How to cite: Sinyutkina A.A. Olennikova A.V., Sun-zu-li L.Yu., Gashkova L.P. Transformation of peat deposits and carbon accumulation in post-pyrogenic raised bogs within the taiga zone of West Siberia. *The Journal of Soils and Environment*. 2024. 7(1). e246 (in Russian with English abstract). DOI: [10.31251/pos.v7i1.246](https://doi.org/10.31251/pos.v7i1.246)

FUNDING

The research was financially supported by the Russian Science Foundation, project No. 22-77-10024.

REFERENCES

Bazanov V.A., Egorov B.A., L'gotin V.A., Skugarev A.A. Modern spatial dynamics of the Great Vasyugan Mire (on the example of the interfluvium of the rivers Iksa and Shegarka). In book: Great Vasyugan Mire: Modern state and development processes / M.V. Kabanov (ed.). Tomsk: Institute of Atmospheric Optics SB RAS Publ., 2002. P. 190–196. (in Russian).

Vomperskii S.E., Glukhova T.V., Smagina M.V., Kovalev A.G. The conditions and consequences of fires in pine forests on drained bogs. *Lesovedenie*. 2007. No. 6. P. 35–44. (in Russian).

- Glukhova T.V., Sirin A.A. Losses of soil carbon upon a fire on a drained forested raised bog. *Eurasian Soil Science*. 2018. Vol. 51. No. 5. P. 542–549. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229318050034>.
- Golovatskaya E.A., Nikonova L.G., Kalashnikova D.A., Simonova G.V. Changes in the nitrogen isotopic composition during the transformation of peat-forming plant litter at dried and post-pyrogenic sites of oligotrophic bogs. *The Journal of Soils and Environment*. 2023. Vol. 6. No. 4. e238. DOI: <https://doi.org/10.31251/pos.v6i4.238>. (in Russian).
- GOST 28245-89. Turf. Methods for determination of botanical composition and degree of decomposition. Moscow: Standards Publishing House, 1989. 6 p. (in Russian).
- GOST 11306-2013. Peat and products of its processing. Methods for determination of ash content. Moscow: Standartinform, 2014. 5 p. (in Russian).
- Efremova T.T., Avrova A.F., Efremov S.P. Calculation method for determination of carbon in the peat and moss litter of forest swamps by ash content of plant substrates. *Siberian Journal of Forest Science*. 2016. No. 6. P. 73–83. DOI: <https://doi.org/10.15372/SJFS20160607>. (in Russian).
- Efremova T.T., Pimenov A.V., Efremov S.P., Avrova A.F. Forest pyrogenic peat soils and gleyzems in swampy mountain valleys in the south of Yenisei Siberia. *Eurasian Soil Science*. 2021. Vol. 54. No. 7. P. 975–985. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229321070036>.
- Zaidel'man F.R., Romanov S.V. Ecological-hydrothermal assessment of pyrogenic soils of cutover peatlands. *Eurasian Soil Science*. 2007. Vol. 40. No. 1. P. 82–92. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229307010127>.
- Kopoteva T.A., Kuptsova V.A. Effect of fires on the functioning of phytocenoses of peat bogs in the Middle-Amur lowland. *Russian Journal of Ecology*. 2016. Vol. 47. No. 1. P. 11–18. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1067413615060089>.
- Malashchuk A.A., Philippov D.A. Post-pyrogenic dynamics of the vegetation cover of the Barskoe raised bog (Vologda Region, Russia). *Ecosystem Transformation*. 2021. Vol. 4. No. 1. P. 104–121. DOI: <https://doi.org/10.23859/estr-200512>. (in Russian).
- Preis Yu.I., Sorokovenko O.R., Bobrov V.A. Actual peat accumulation in bog rams in south forest zone of Western Siberia as a response to climatic changes. *Tomsk State University Journal*. 2010. No. 333. P. 187–194. (in Russian).
- Sinyutkina A.A., Gashkova L.P. Microhabitats differentiation of peat water content of drained and burned out raised bogs within southern taiga of Western Siberia. In book: *Soils and Environment [Electronic resource]: Collection of scientific papers of the All-Russian scientific conference with international participation, dedicated to the 55th anniversary of the Institute of Soil Science and Agrochemistry SB RAS (Novosibirsk, October 2–6, 2023)*. Novosibirsk: ISSA SB RAS, 2023. P. 482–485. DOI: <https://doi.org/10.31251/conf1-2023>. (in Russian).
- Sinyutkina A.A., Gashkova L.P., Maloletko A.A., Magur M.G., Kharanzhevskaya Y.A. Transformation of the surface and vegetation cover of drained bogs in Tomsk region. *Tomsk State University Journal of Biology*. 2018. Vol. 43. P. 196–223. DOI: <https://doi.org/10.17223/19988591/43/10>. (in Russian).
- Sinyutkina A.A., Gashkova L.P., Kharanzhevskaya Yu.A. Pyrogenic changes in mire vegetation and peat in Western Siberia. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seria 5. Geografia*. 2024. No. 1. P. 77–88. DOI: <https://doi.org/10.55959/MSU0579-9414.5.79.1.6>. (in Russian).
- Sirin A.A., Makarov D.A., Maslov A.A., Gul'be Y.I., Gummert I. Depth of peat burning and carbon loss during an underground forest fire. *Contemporary Problems of Ecology*. 2020. Vol. 13. No. 7. P. 769–779. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1995425520070112>.
- Tyuremnov S.N. *Peatlands*. Moscow: Nedra Publ., 1976. 488 p. (in Russian).
- Tsyganov A.N., Babeshko K.V., Borisova T.V., Mazei Y.A., Novenko E.Y., Mazei N.G. Postfire succession of mire ecosystems reconstructed using paleoecological analysis: a case study of Novoaleksandrovskoe Mire (Meshchera Lowland, Ryazan Oblast). *Biology Bulletin*. 2018. Vol. 45. No. 5. P. 512–518. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1062359018050151>.
- Chernova O.V., Golozubov O.M., Alyabina I.O., Schepaschenko D.G. Integrated approach to spatial assessment of soil organic carbon in the Russian federation. *Eurasian Soil Science*. 2021. Vol. 54. No. 3. P. 325–336. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229321030042>.
- Ackley C., Tank S.E., Haynes K. M., Rezanezhad F., McCarter C., Quintana W.L. Coupled hydrological and geochemical impacts of wildfire in peatland-dominated regions of discontinuous permafrost. *Science of the Total Environment*. 2021. No. 782. 146841. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146841>.
- Benscotter B.W., Greenacre D., Turetsky M.R. Wildfire as a key determinant of peatland microtopography. *Canadian Journal of Forest Research*. 2015. No. 45. P. 1133–1137. DOI: <https://doi.org/10.1139/cjfr-2015-0028>.

- Benscoter B.W., Vitt D.H. Spatial patterns and temporal trajectories of the bog ground layer along a post-fire chronosequence. *Ecosystems*. 2008. No. 11. P. 1054–1064. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10021-008-9178-4>.
- Benscoter B.W., Vitt D.H., Wieder R.K. Association of postfire peat accumulation and microtopography in boreal bogs. *Canadian Journal of Forest Research*. 2005. No. 35. P. 2188–2193.
- Borren W., Bleuten W., Lapshina E.D. Holocene peat and carbon accumulation rates in the southern taiga of western Siberia. *Quaternary Research*. 2004. No. 61. P. 42–51. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2003.09.002>.
- Chambers F.M., Beilman D.W., Yu. Z. Methods for determining peat humification and for quantifying peat bulk density, organic matter and carbon content for palaeostructural studies of climate and peatland carbon dynamic. *Mires and Peat*. 2011. Vol. 7. Article 07. P. 1–10.
- Feurdean A., Florescu G., Tantau I., Vanniere B., Diaconu A.-C., Pfeiffer M., Warren D., Hutchinson S.M., Gorina N., Gałka M., Kirpotin S. Recent fire regime in the southern boreal forests of western Siberia is unprecedented in the last five millennia. *Quaternary Science Reviews*. 2020. No. 244. 106495. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2020.106495>.
- Holden J., Burt T.P. Hydrological studies on blanket peat: the significance of the acrotelm-catotelm model. *Journal of Ecology*. 2003. No. 91. P. 86–102. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1365-2745.2003.00748.x>.
- Kettridge N., Turetsky M., Sherwood J., Thompson D.K., Moller C.A., Benscoter B.W., Flannigan M.D., Wotton B.M., Waddington J.M. Moderate drop in water table increases peatland vulnerability to post-fire regime shift. *Scientific Reports*. 2015. No. 5. 8063. DOI: <https://doi.org/10.1038/srep08063>.
- Lin S., Liu Ya., Huang X. Climate-induced Arctic-boreal peatland fire and carbon loss in the 21st century. *Science of the Total Environment*. 2021. No. 796. 148924. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148924>.
- Lukenbach M.C., Hokanson K.J., Devito K.J., Kettridge N., Petrone R.M., Mendoza C.A., Granath G., Waddington J.M. Post-fire ecohydrological conditions at peatland margins in different hydrogeological settings of the Boreal Plain. *Journal of Hydrology*. 2017. No. 548. P. 741–753. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.03.034>.
- Marcotte A.L., Limpens J., Stoof C.R., Stoorvogel J.J. Can ash from smoldering fires increase peatland soil pH? *International Journal of Wildland Fire*. 2022. No. 31. P. 607–620. DOI: <https://doi.org/10.1071/WF21150>.
- Moore P.A., Lukenbach M.C., Kettridge N., Petrone R.M., Devito K.J., Waddington J.M. Peatland water repellency: Importance of soil water content, moss species, and burn severity. *Journal of Hydrology*. 2017. No. 554. P. 656–665. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.09.036>.
- Sinyutkina A. Drainage consequences and self-restoration of drained raised bogs in the south-eastern part of Western Siberia: Peat accumulation and vegetation dynamics. *Catena*. 2021. No. 205. 105464. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105464>.
- Taminskas J., Linkeviciene R., Simanauskiene R., Jukna L., Kibirkstis G., Tamkeviciute M. Climate change and water table fluctuation: Implications for raised bog surface variability. *Geomorphology*. 2018. No. 304. P. 40–49. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.12.026>.
- Thompson D.K., Waddington J.M. Wildfire effects on vadose zone hydrology in forested boreal peatland microforms. *Journal of Hydrology*. 2013. No. 486. P. 48–56. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.01.014>.
- Wieder R.K., Scott K., Kamminga K., Vile M.A., Vitt D.H., Bone T., Xu B., Benscoter B.W., Bhatti J.A. Postfire carbon balance in boreal bogs of Alberta, Canada. *Global Change Biology*. 2009. No. 15. P. 63–81. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01756.x>.

Received 18 January 2024

Accepted 13 March 2024

Published 18 March 2024

About the authors:

Anna A. Sinyutkina – Candidate of Geography Sciences, Senior Researcher in the Research Department of the Siberian Federal Scientific Centre of Agro-Bio Technologies of the Russian Academy of Sciences, Siberian Research Institute of Agriculture and Peat (Tomsk, Russia); ankalaeva@yandex.ru

Arina V. Olennikova – Junior Researcher in the Research Department of the Siberian Federal Scientific Centre of Agro-Bio Technologies of the Russian Academy of Sciences, Siberian Research Institute of Agriculture and Peat (Tomsk, Russia); olennikovaarin@yandex.ru

Lyudmila Yu. Sun-zu-li – Junior Researcher in the Research Department of the Siberian Federal Scientific Centre of Agro-Bio Technologies of the Russian Academy of Sciences, Siberian Research Institute of Agriculture and Peat (Tomsk, Russia); lyuda.sunzuli@mail.ru

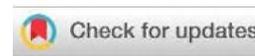
Lyudmila P. Gashkova – Candidate of Geography Sciences, Senior Researcher in the Research Department of the Siberian Federal Scientific Centre of Agro-Bio Technologies of the Russian Academy of Sciences, Siberian Research Institute of Agriculture and Peat (Tomsk, Russia); gashkova-lp@rambler.ru

The authors read and approved the final manuscript



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

УДК 631.4

<https://doi.org/10.31251/pos.v7i1.250>

Влияние многолетней динамики уровня грунтовых вод на зимнее перераспределение влаги в пахотных почвах Ишимской степи

© 2024 Ю. В. Кравцов

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

Цель исследования. Установить влияние многолетней динамики уровня грунтовых вод на зимнее перераспределение влаги в пахотных почвах Ишимской степи.

Место и время проведения. Ишим-Иртышское степное междуречье (Ишимская степь), 1986–1989 и 2002–2024 гг.

Методы. Исходный материал отобран в процессе почвенно-гидрологических наблюдений на опорных разрезах пахотных почв. Влажность почв и подпочвенных пород измерли термостатно-весовым методом в предзимний период (вторая – третья декады октября) и в завершении зимнего сезона (третья декада марта). Глубину залегания грунтовых вод измеряли в скважинах ручного бурения параллельно с отбором образцов почв на влажность. Слой криогенной аккумуляции и объем намерзания влаги определяли методом сравнения профилей влажности в середине октября и в третьей декаде марта. Снегосъемку проводили в третьей декаде марта. Глубину проникновения температуры 0°C выявляли с помощью вытяжных термометров.

Основные результаты. В пределах плакорных участков водоносный горизонт в течение второй половины XX века поднялся с различных глубин до уровня, превышающего критический. Основной причиной подъема являлась хозяйственная деятельность. В первые десятилетия нового столетия, при положении грунтовых вод выше критической глубины, уровень их залегания в летне-осеннее время начал определяться суммами атмосферных осадков предыдущего холодного сезона года.

Особенности зимнего перераспределения влаги в пахотных почвах во многом обусловлены глубиной залегания грунтовых вод в осенний сезон. Если в почвах плакорных участков грунтовые воды отмечаются осенью на глубине более 4 м, что было характерно для 1980-х гг., слой криогенной аккумуляции влаги формируется ниже горизонтов интенсивного и полного десуктивного иссушения по посевам яровых зерновых, с глубины 0,8 м. Объем намерзания влаги не превышает 30 мм. Мигрировавшая влага практически не участвует в восполнении послевегетационного дефицита влажности в верхнем метровом слое почв. Если грунтовые воды во второй – третьей декадах октября выявляются на глубине менее 4 м, что типично для плакорных участков в 2000-е – 2020-е гг., слой криогенной аккумуляции прослеживается с глубины 0,4–0,8 м, объем намерзающей влаги может достигать 50 мм, в том числе, в верхнем метровом слое – 25 мм. Намерзшая в верхнем метровом слое влага способствует снижению послевегетационного дефицита, однако создает условия для анаэробнозиса во втором полуметровом слое почв и выступает «островом холода», задерживая весеннее прогревание почв до активных температур.

В почвах отрицательных форм рельефа уровень грунтовых вод в течение периода полевых наблюдений отмечается на уровне, превышающем критический. Поэтому черты зимнего перераспределения влаги в их профиле аналогичны установленным характеристикам этого явления в плакорных почвах в 2002–2024 гг.

Заключение. Уровень грунтовых вод в почвенно-грунтовых толщах плакорных участков Ишимской степи подвержен многолетней динамике под влиянием антропогенных и природных факторов в течение последних двадцати лет. Осенней глубиной залегания грунтовых вод определяются параметры зимнего перераспределения влаги в пахотных почвах плакоров – чем выше уровень, тем больший объем намерзания влаги фиксируется, тем ближе к дневной поверхности расположен слой криогенной аккумуляции.

Ключевые слова: критическая глубина; криогенная аккумуляция; корнеобитаемый слой; почвенно-гидрологический горизонт; намерзание влаги; пористость аэрации.

Цитирование: Кравцов Ю.В. Влияние многолетней динамики уровня грунтовых вод на зимнее перераспределение влаги в пахотных почвах Ишимской степи // Почвы и окружающая среда. 2024. Том 7. № 1. e250. DOI: [10.31251/pos.v7i1.250](https://doi.org/10.31251/pos.v7i1.250).

ВВЕДЕНИЕ

Ишимская степь (Ишим-Иртышское степное междуречье) – важный аграрный регион Сибири, специализирующийся на производстве зерна и кормовых трав. Этим определяется непреходящее значение мониторинга состояния природных ресурсов региона, в том числе, и ресурсов почвенной влаги, используемых в растениеводстве.

Для пахотных почв Ишим-Иртышского степного междуречья, особенно для плакорных, типичны ограниченные запасы влаги в период активной вегетации сельскохозяйственных культур (Кравцов, 2014). Поэтому поиск путей оптимизации этих запасов остается важной научно-практической задачей. В течение холодного сезона года в почвенно-грунтовых толщах региона возможно перераспределение влаги, которое происходит в сезонно промерзающий слой из нижних непромерзающих постоянно влажных толщ грунта под воздействием температурного градиента. Перераспределенная в слой намерзания влага может сохраняться в нем до начала периода вегетации. Таким образом, зимнее термоградиентное передвижение влаги может считаться одним из процессов восполнения ресурсов доступной растениям влаги в корнеобитаемом слое. На этом основании установление особенностей пространственного положения слоя криогенной аккумуляции и объема намерзающей в нем воды, определение механизмов передвижения влаги в промерзающий слой в условиях Ишимской степи, выявление роли намерзшей влаги в восполнении послевегетационного дефицита влажности в корнеобитаемом слое пахотных почв представляются актуальными практико-ориентированными вопросами.

Одним из значимых факторов криогенной аккумуляции влаги является исходная осенняя влажность почвенно-грунтовых толщ, связанная с близостью водоносного горизонта к земной поверхности (Панфилов, 1973; Сеньков, 1978). Грунтовые воды на плакорных участках Ишим-Иртышского степного междуречья известны межгодовой и многолетней изменчивостью глубины залегания (Кравцов, 2009; 2023). Как многолетняя динамика уровня грунтовых вод отражается на объемах намерзания влаги и глубине расположения слоя ее криогенной аккумуляции в почвах Ишимской степи – важный практический вопрос, на который до сих пор нет внятного ответа.

Цель работы – установить влияние многолетней динамики уровня грунтовых вод на зимнее перераспределение влаги в пахотных почвах Ишимской степи.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Полевые изыскания осуществляли в течение 1986–1989 и 2002–2024 гг. Наблюдения проводили на ключевом почвенно-геоморфологическом профиле в центральной, наиболее возвышенной части Ишим-Иртышского степного междуречья, проведенном от уреза воды в котловине урочища Сарыколь на запад-юго-запад до наиболее возвышенной поверхности водораздельного пространства. Обзор особенностей природных условий региона неоднократно приводился в предыдущих публикациях (Кравцов, 2004; 2021). Из этих особенностей выделим краткую химическую характеристику грунтовых вод (табл. 1).

Таблица 1

Состав солей грунтовых вод Ишимской степи (Сеньков, 2004)

Разрез	Глубина, м	Σ солей, г/л	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ + K ⁺
			Мг-экв./л						
1	2,36	36,74	-	3,28	563,60	84,47	69,50	234,17	306,00
2	3,75	26,59	-	4,08	322,00	84,91	43,50	125,83	222,60
7	4,35	22,20	-	1,76	309,00	83,64	75,00	79,17	202,17
8	2,95	2,15	1,95	13,17	3,12	13,46	1,15	3,41	25,09
9	4,88	14,80	-	3,92	178,00	79,42	33,50	54,17	135,35

Некоторые характеристики опорных разрезов профиля представлены в таблице 2.

Объем намерзшей влаги и расположение слоя ее сезонной аккумуляции устанавливали путем сравнения профилей влажности, построенных по материалам наблюдений во второй – третьей декадах октября и в третьей декаде марта. Образцы для построения профилей влажности отбирали в процессе ручного бурения до глубины залегания грунтовых вод и обрабатывали термостатно-весовым методом. В пробуренных скважинах параллельно выявлялся уровень грунтовых вод путем замеров глубины их залегания. Мощность снежного покрова и запасы в нем влаги определяли в процессе снегосъемки в третьей декаде марта, когда в Ишимской степи отмечается максимальная

мощность снежного покрова. Температура почвенно-грунтовых толщ измеряла вытяжными термометрами в диапазоне глубин 0,2–3,2 м параллельно с отбором образцов почв на влажность.

Таблица 2

Объекты исследования и характеристика их местоположения

Разрез	Географические координаты	Абсолютная высота, м, рельеф	Название почвы, согласно Классификации... (1977), по результатам работ 1986 г.
4	53°43'50.26" с.ш. 74°03'45.49" в.д.	110, склон первой надпойменной террасы мезокотловины	Луговая солончаковатая
1	53°43'47.14" с.ш. 74°03'35.59" в.д.	111, площадка первой надпойменной террасы мезокотловины	Черноземно-луговая солончаковатая
2	53°43'34.82" с.ш. 74°02'45.24" в.д.	114, площадка второй надпойменной террасы мезокотловины	Чернозем южный карбонатный солончаковатый
7	53°43'12.52" с.ш. 73°57'01.65" в.д.	121, плакор, микроповышение	Чернозем южный карбонатный солончаковатый
8	53°43'22.83" с.ш. 73°57'03.42" в.д.	120, плакор, микропонижение	Лугово-черноземная выщелоченная
9	53°41'18.30" с.ш. 73°47'02.10" в.д.	135, плакор	Чернозем южный карбонатный

При построении и анализе профилей влажности использовано положение А.А. Роде (1963) о почвенно-гидрологических горизонтах. С учетом разработанных им критериев в профиле исследуемых почв и подпочвенных пород выделяли следующие горизонты: 1) водоносный или полного насыщения, содержащий свободную гравитационную воду на уровне полной влагоемкости; 2) капиллярного насыщения, содержащий капиллярно-подпертую влагу и свободную гравитационную влагу в интервале от полной до наименьшей влагоемкости; 3) наименьшего насыщения с подвешенной влагой на уровне наименьшей влагоемкости; 4) слабого и интенсивного десуктивного иссушения с интервалом влажности от 100 до 80% наименьшей влагоемкости и от 80% наименьшей влагоемкости до влажности завядания, соответственно; 5) полного десуктивного иссушения с рыхлосвязанной влагой ниже уровня влажности завядания.

Градация снежности зимних сезонов дана по А.А. Танасиенко (2003). В работе использованы материалы многолетних метеорологических наблюдений на метеостанции «Русская Поляна» Обь-Иртышского управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (УГМС). По данным этой метеостанции, в течение 1986–1989 гг. преобладали нормальные по снежности сезоны (средняя сумма атмосферных осадков ноября – марта составляла 105 мм). В 2000–2008 гг. доминировали очень многоснежные сезоны со средним количеством осадков 136 мм. С 2009 г. по 2022 г. наблюдали в основном малоснежные холодные сезоны года со средней суммой осадков 89 мм.

Связь между количеством атмосферных осадков и уровнем грунтовых вод устанавливала с помощью программы Microsoft Excel.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По материалам наблюдений на плакорных распаханых участках Ишимской степи выявлена многолетняя динамика уровня грунтовых вод. Во второй половине 1980-х гг. в опорных разрезах плакорных почв исследуемого региона грунтовые воды фиксировали на глубине 4–5 м. Учитывая косвенные данные, можно предполагать, что в течение 1960–1970-х гг. водоносный горизонт в пределах возвышенных выровненных местоположений находился на еще больших глубинах – 6–10 м. Среди этих данных выделим:

1) содержание крупномасштабных топографических карт района исследования, составленных в 1961 г.: на этих картах вода в колодцах на плакорных участках обозначена на глубине 8–10 м (Топографическая карта ..., 1965а; 1965б);

2) свидетельства почвоведов 1950–1960-х гг.: при характеристике природных условий и почвенного покрова Ишимской степи, при описании почвенных разрезов в пределах возвышенных выровненных местоположений они не упоминали глубины залегания грунтовых вод или сообщали о

глубоком их положении; исследователи не поднимали вопроса о гидроморфизме почв плакорных участков (Горшенин, 1955; Градобоев и др., 1960);

3) показания местных жителей, согласно которым в поселке Русская Поляна в 1964 г. уровень грунтовых вод фиксировался на глубине 12–13 м вместо современных 1–2 м.

В 2000-х гг. в опорных разрезах ключевого профиля глубина залегания грунтовых вод составляла 2,5–3,5 м, т.е. превышала критическую (рис. 1 А). Под критической глубиной понимается расстояние от поверхности почвы до уровня грунтовой воды, при уменьшении которого расход воды на испарение вызывает засоление корнеобитаемого слоя выше предела токсичности (Толковый словарь ..., 1975). В исследуемых почвенно-грунтовых толщах критическая глубина залегания грунтовых вод составляет 3,9 м (Панфилов и др., 1988). С 2009 по 2024 гг. уровень грунтовых вод отмечается на глубине порядка 3,5 м. Отметим при этом, что в опорных разрезах почв отрицательных форм рельефа, развивающихся в условиях дополнительного поверхностного или грунтового увлажнения, уровень грунтовых вод в течение последних почти 40 лет полевых наблюдений не подвергся заметным изменениям (рис. 1 Б).

Выявленные изменения в глубине залегания грунтовых вод в плакорных почвах обусловлены тяжелосуглинистым гранулометрическим составом материнской породы с высоким (до 45%) содержанием илистой фракции. Почвы с такими характеристиками отличаются преобладанием микропор в структуре общей пористости (до 70% суммарного объема пор). Микропористостью предопределена минимальная резервная водовместимость почв при влажности на уровне наименьшей влагоемкости (4–6% объема почвы). Такой генетической особенностью обусловлена возможность быстрого изменения уровня грунтовых вод при нарушениях водного баланса территории.

Причиной установленного подъема грунтовых вод стали нарушения водного баланса антропогенной природы. Нарушения связаны с распашкой территории и, соответственно, с уничтожением естественной растительности и культивированием на ее месте преимущественно яровых зерновых, а также с высадкой полезащитных лесных полос. В результате уничтожения естественной растительности и выращивания на ее месте яровых зерновых культур уменьшилось эваподесукативное иссушение почв, снизилось суммарное испарение с полей, возрос приток воды в центр микропонижений, где часть поверхностной влаги стала ежегодно попадать в водоносный горизонт, вызывая постепенный подъем его уровня. По поводу полезащитных лесопосадок как фактора подъема грунтовых вод отметим следующее. Лесополосы ажурно-продуваемой конструкции создавались в течение 1970-х – 1980-х гг. как одно из средств преодоления «черных» бурь на обширных распаханных пространствах и для улучшения микроклимата полей, в том числе, и для более равномерного распределения снега по ним. Однако соответствовали они предъявляемым требованиям только в течение первых лет существования и на стадии деградации. Пока молодые посадки характеризовались негустыми кронами и небольшой высотой древостоя (3–4 м), снег по полям с такими полосами распределялся достаточно равномерно. Так, в «ветровой тени» лесопосадки 1984 г. в третьей декаде марта 1989 г. мощность снега достигала 0,4–0,5 м, при ширине сугроба до 30 м. В то же время, на поле за пределами этого сугроба высота снежного покрова изменялась от 0,15 до 0,30 м. В последние годы лесопосадки находятся в стадии деградации. Деревья засыхают и выпиливаются, лесополосы, таким образом, прореживаются. Снег по полям с такими посадками вновь распределяется достаточно равномерно. Так, в третьей декаде марта 2024 г. в «ветровой тени» за лесопосадкой 1973 г. отмечался сугроб шириной 85 м и высотой до 1,2 м; за его пределами на пашне фиксировался снежный покров мощностью 0,4–0,7 м.

В зрелой же лесополосе, возрастом 15–35 лет, кроны характеризуются сомкнутостью, высота древостоя достигает 10–15 м. Посадка превращается в насаждение плотной, непродуваемой конструкции. В такой полосе и сразу же за ней из-за резкого снижения скорости ветра аккумулируется большое количество снега: сугроб начинается еще с наветренной стороны насаждения, его высота достигает максимума сразу с подветренной стороны посадки, в 10–15 м от края полосы. Общая ширина такого сугроба составляет 50–70 м. В наиболее высокой его части мощность снега может превысить 3 м (третья декада марта 1988 г.), при этом на поле – 0,15–0,25 м. Поскольку основная масса снега скапливалась в непосредственной близости от таких непрочищаемых лесонасаждений, в условиях плоского рельефа часть талой снеговой влаги у лесополос просачивалась в горизонт грунтовых вод, также вызывая подъем их уровня.

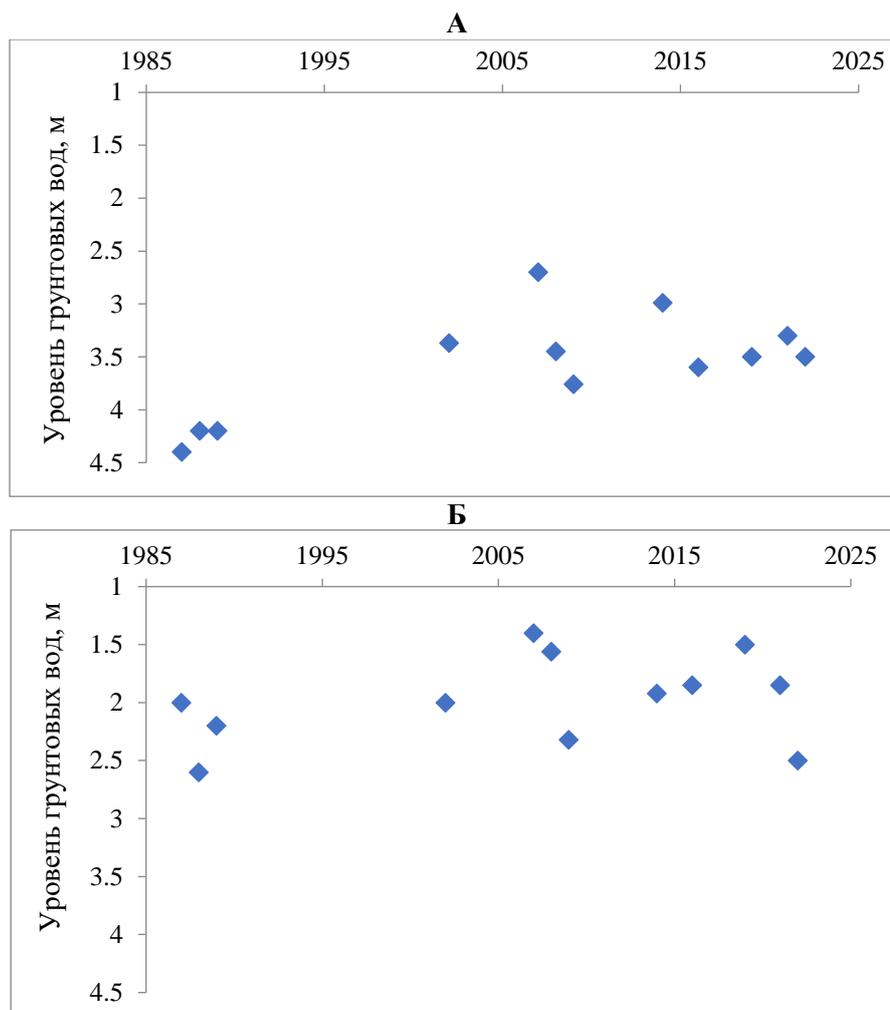


Рисунок 1. Многолетняя динамика уровня грунтовых вод в опорных разрезах: А – разрез 7; Б – разрез 1.

При положении грунтовых вод на глубинах, превышающих критические, установлено, что их уровень в плакорных почвах в течение периода активной вегетации зависит от суммы атмосферных осадков предыдущего холодного сезона года. Так, например, между количеством атмосферных осадков ноября – марта в течение 2009–2022 гг. и уровнем грунтовых вод в почвах плакорных местоположений в июне наблюдается пропорциональная связь с весьма высокой величиной достоверной аппроксимации (рис. 2).

В почвах отрицательных форм рельефа в течение всех лет наблюдений грунтовые воды отмечены выше критической глубины (см. рис. 1).

Таким образом, в многолетней динамике глубины залегания грунтовых вод на плакорных участках Ишим-Иртышского степного междуречья после их распашки в середине 1950-х гг. возможно выделить две стадии.

1. Стадия подъема их уровня до критических глубин и выше. Начался подъем, вероятно, в 1960-е гг. и завершился в начале 2000-х гг. Основной причиной многолетнего подъема явилась хозяйственная деятельность.

2. Стадия пребывания уровня на глубинах, превышающих критические (2000–2020-е гг.). Для этой стадии характерны межгодовые изменения глубины залегания грунтовых вод в зависимости от сумм атмосферных осадков предыдущего зимнего сезона. В течение промежутка лет с преобладанием малоснежных зимних сезонов в почвах выявлено более глубокое залегание водоносного горизонта, по сравнению с годами с многоснежными зимами (2000–2008 гг.). Вместе с тем, эти показатели еще не сравнивались с отметками уровня грунтовых вод, зафиксированными во второй половине 1980-х гг. (табл. 3).

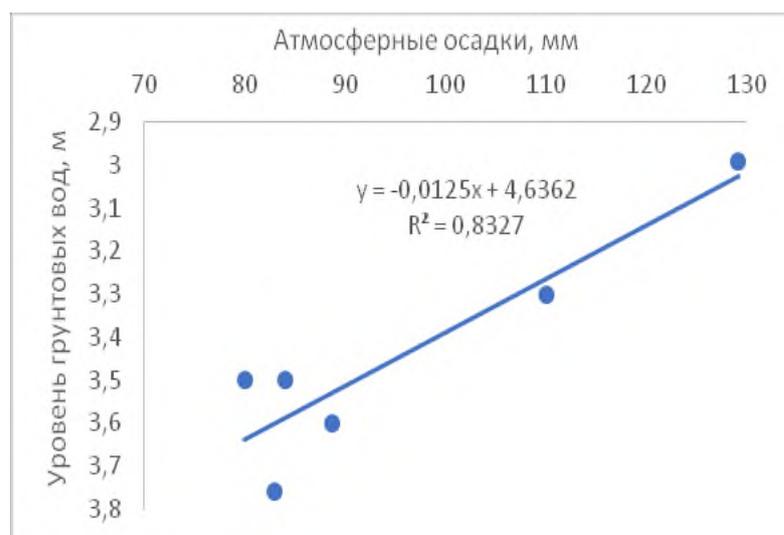


Рисунок 2. Пропорциональность между суммой атмосферных осадков ноября – марта в 2009–2022 гг. и уровнем грунтовых вод в почве опорного разреза 7 в июне.

Таблица 3

Средний уровень грунтовых вод в опорных разрезах в июне, м

Разрез	1986–1989 гг.	2000–2008 гг.	2009–2022 гг.
4	1,8	1,5	2,0
1	2,3	1,7	2,0
2	3,7	1,8	2,5
7	4,3	3,1	3,4
8	3,1	2,2	2,8
9	4,6	3,6	3,7

Подъемом грунтовых вод в течение 1960-х – 2000-х гг. предопределено качественное изменение гидрологического состояния плакорных почв. Во второй половине 1980-х гг. грунтовые воды отмечали ниже критической глубины, пахотные плакорные почвы характеризовались непромывным водным режимом. В 2000-е – 2020-е гг. водоносный горизонт оказался на глубинах, превышающих критическую, и первично-автоморфные почвы начали развиваться в условиях дополнительного грунтового увлажнения. Выявленные особенности положения грунтовых вод и связанные с ними характеристики гидрологического состояния плакорных почв отразились и на процессах зимнего перераспределения влаги.

Во второй половине 1980-х гг. в предзимнее время (вторая – третья декады октября) в плакорных почвах по посевам яровых зерновых культур слой интенсивного и полного эваподесукативного иссушения прослеживался с поверхности почв до глубины 0,8 м. Под слоем летнего иссушения отмечалось резкое увеличение влажности и на глубинах 1,0–2,0 м фиксировался горизонт наименьшего насыщения. Еще ниже обнаруживался горизонт капиллярного насыщения (капиллярная кайма грунтовых вод). Грунтовые воды в плакорных почвах по яровым зерновым осенью отмечались на глубине 4,0–4,5 м (рис. 3).

Расположение слоя криогенной аккумуляции в почвенно-грунтовых толщах и объем намерзающей в нем влаги зависят от глубины проникновения температуры 0°C. Глубина проникновения 0° в почвенно-грунтовые толщи Ишимской степи определяется температурами воздуха зимних месяцев и мощностью снежного покрова; к третьей декаде марта 1980-х гг. она составляла 1,7–2,4 м. Близость грунтовых вод и их капиллярной каймы практически не влияет на глубину проникновения 0° в почвенно-грунтовые толщи. Это связано с минимальным содержанием капиллярно-подпертой воды в горизонте капиллярного насыщения (порядка 2% объема почвы) и, следовательно, с очень небольшим различием во влагосодержании между капиллярной каймой грунтовых вод и горизонтом наименьшего насыщения. В случае охвата капиллярной каймы грунтовых вод сезонным промерзанием глубина проникновения 0° уменьшается, как правило, на 0,1 м.

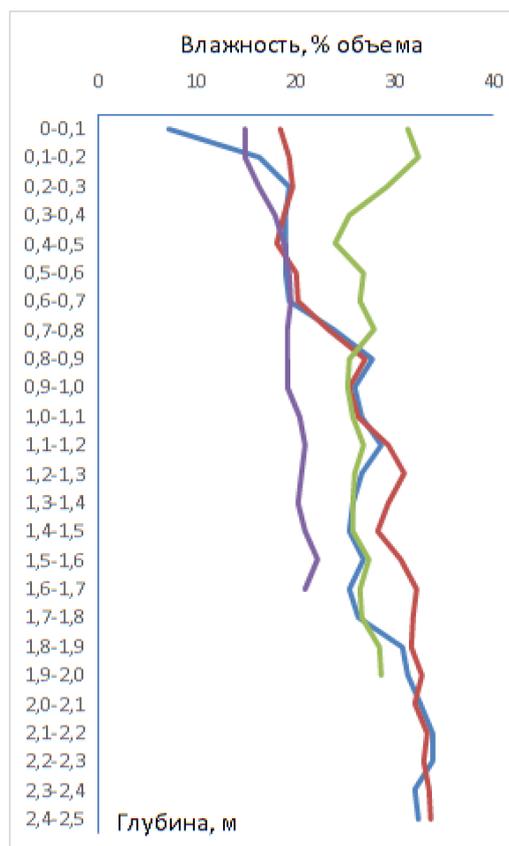


Рисунок 3. Изменение профиля влажности в течение зимнего сезона 1988–1989 гг. Опорный разрез 7.

Условные обозначения:

- - влажность завядания;
 - - наименьшая влагоемкость;
 - - влажность 16.10.1988 г., уровень грунтовых вод – 4,40 м;
 - - влажность 24.03.1989 г., уровень грунтовых вод – 4,75 м;
- суммарная прибавка влаги в слое криогенной аккумуляции – 21 мм.

Во второй половине 1980-х гг. верхняя граница слоя криогенной аккумуляции влаги в профиле плакорных почв по яровым зерновым культурам отмечалась на одной и той же отметке – на глубине 0,8 м. Это связано с тем, что выше расположен слой летнего иссушения с очень низким влагосодержанием, в котором процессы зимнего перераспределения влаги полевыми методами зафиксировать сложно. Нижняя граница слоя зимнего накопления влаги зависит от глубины проникновения 0° в почвенно-грунтовую толщу – чем больше глубина, тем ниже граница. В третьей декаде марта эта граница фиксировалась на отметках 1,6–2,0 м от земной поверхности, т.е. на 0,2–0,4 м выше глубины проникновения 0° . Объем намерзания влаги в этом слое достигал 15–30 мм, влажность в итоге могла превысить уровень капиллярной влагоемкости. Объем намерзания увеличивался при возрастании вертикальной мощности слоя криогенной аккумуляции. В слой сезонной аккумуляции влага поступала из нижних, непромерзающих толщ грунта, характеризовавшихся повышенной влажностью (на уровне капиллярной влагоемкости). Однако, в связи с минимальными объемами перераспределявшейся влаги, уменьшение влагосодержания в нижних непромерзающих толщах не всегда уверенно определялось. Зато отчетливо устанавливалось снижение уровня грунтовых вод от середины октября к третьей декаде марта на 0,25–0,50 м, что при водоотдаче исследуемых почвенно-грунтовых толщ в 0,06 соответствует объему влаги, перераспределявшейся из непромерзающих толщ. Определяемое полевыми методами перераспределение влаги в пахотных почвах Ишимской степи приходилось на вторую половину зимнего сезона, когда отрицательные температуры проникали в высоко увлажненные почвенно-грунтовые толщи под слоем летнего иссушения.

По мере прогревания почв намерзавшая влага оттаивала, частично опускалась вниз под действием силы тяжести, отчасти оставалась на месте. Отметим при этом, что перераспределение оттаивавшей гравитационной влаги в микропористых почвенно-грунтовых толщах Ишимской степи – процесс продолжительный и небольшой по объему. Фильтрации этой формы почвенной влаги вниз препятствовал мерзлотный экран из не успевших оттаять слоев породы. Величину бокового оттока гравитационной влаги нужно считать близкой к нулю из-за небольшого ее объема в микропористых породах и практического отсутствия уклонов земной поверхности, за исключением склонов микро- и мезопонижений. Поскольку слой с зимним увеличением содержания влаги формировался ниже корнеобитаемого, роль намерзания в устранении послевегетационного дефицита влажности в плакорных почвах с посевами яровых зерновых являлась ничтожной. Вместе с тем, в слое зимней аккумуляции пористость аэрации могла падать до критических значений, что создавало условия для развития анаэробнозиса и современного подпочвенного гидроморфизма.

В 2000-е – 2020-е гг. на полях Ишимской степи продолжалось доминирование посевов яровых зерновых культур, поэтому в осенних профилях влажности распашанных плакорных почв сохраняются многие особенности, выявленные в 1980-е гг. Вместе с тем, в связи с положением грунтовых вод на глубинах, превышающих критические, вертикальная мощность слоя иссушения по яровым зерновым осенью характеризуется мощностью только 0,6–0,8 м. Влагосодержание в слое летнего иссушения по-прежнему колеблется вокруг уровня влажности завядания. Ниже отметок 0,6–0,8 м после небольшого переходного слоя (порядка 0,2 м) отмечается горизонт капиллярного насыщения, поскольку грунтовые воды фиксируются выше критической глубины – на отметках менее 4 м (рис. 4).

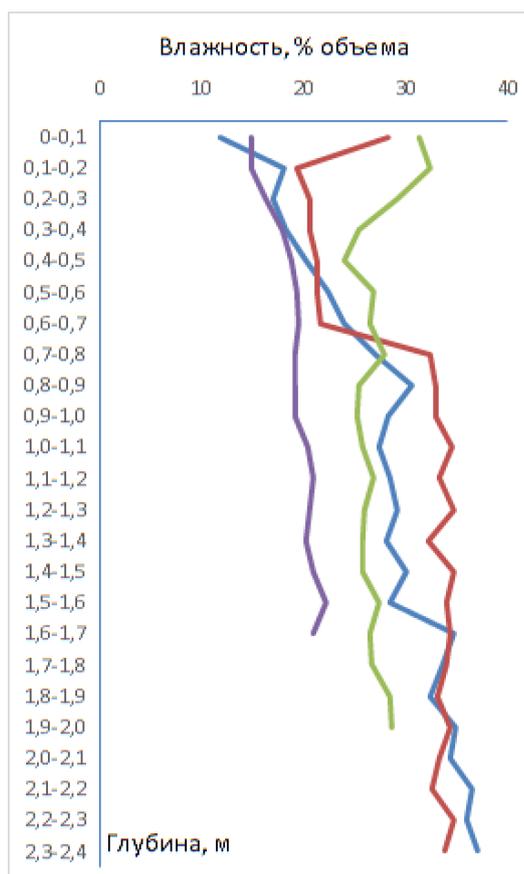


Рисунок 4. Изменение профиля влажности в течение зимнего сезона 2017–2018 гг. Опорный разрез 7.

Условные обозначения:

- влажность завядания;
 - наименьшая влагоемкость;
 - влажность 20.10.2017 г., уровень грунтовых вод – 2,74 м;
 - влажность 21.03.2018 г., уровень грунтовых вод – 3,55 м;
- суммарная прибавка влаги в слое криогенной аккумуляции – 39 мм.

Глубины проникновения 0° в почвенно-грунтовые толщи в 2000-х – 2020-х годах заметно не изменились по сравнению со второй половиной 1980-х гг. Это объясняется сохранением в течение периода полевых наблюдений средних температур воздуха и сумм атмосферных осадков за ноябрь – март на одном уровне (в среднем -12°C и 115 мм соответственно). Это положение не противоречит тезису о проявлении глобального потепления в статистически достоверном повышении средних температур воздуха зимних месяцев в южных районах Западной Сибири. Эти температуры в последние десятилетия действительно оказываются более высокими по сравнению с 1961–1990 гг., которые предложены Всемирной метеорологической организацией в качестве промежутка лет для расчета климатических норм. Это прослеживается и по материалам наблюдений на метеостанции «Русская Поляна»: средняя за 1961–1990 гг. температура зимних месяцев составила $-13,1^\circ\text{C}$, за 1991–2022 гг. – $-11,8^\circ\text{C}$.

В связи с изменениями осеннего профиля влажности пахотных плакорных почв верхняя граница слоя криогенной аккумуляции влаги в течение 2000–2020-х гг. стала отмечаться выше – на глубине 0,6–0,8 м. Это обусловлено более высоким осенним положением грунтовых вод и, соответственно, повышенной влажностью второго полуметрового слоя почв. Нижняя граница слоя намерзания по-прежнему зависит от глубины проникновения 0° в почвенно-грунтовую толщу и в третьей декаде марта фиксируется на отметках 1,5–2,0 м. Объем намерзшей влаги достигает 30–50 мм, причем, до 25 мм зимней прибавки приходится на слой 0–1,0 м. В результате намерзания влажность в слое зимней аккумуляции влаги возрастает выше уровня капиллярной влагоемкости. Уменьшение влагосодержания в нижних непромерзающих слоях почвенно-грунтовой толщи полевыми методами не фиксируется. Однако четко устанавливается снижение уровня грунтовых вод от октября к марту на 0,5–1,0 м. Таким образом, затраты влаги на криогенную аккумуляцию из непромерзающей части горизонта капиллярного насыщения компенсируются поступлением влаги из грунтовых вод, вызывая соответствующее понижение их уровня.

По мере оттаивания и прогревания почв, часть намерзшей сверх уровня капиллярной влагоемкости влаги под действием силы тяжести просачивается вниз, вызывая подъем грунтовых вод. Вместе с тем, в слое криогенной аккумуляции, в том числе, и в верхнем метровом слое, в весеннее и раннелетнее время остается часть перераспределенной зимой влаги. С позиций растениеводства ее роль можно оценить скорее негативно, чем позитивно. Намерзшая влага в нижней части второго полуметрового слоя почв способствует снижению пористости аэрации до критических значений (до 12% объема почвы и ниже), что благоприятствует развитию анаэробнозиса и проявлениям гидроморфизма; слой с намерзшей влагой представляет собой «остров холода», наличие которого задерживает весеннее прогревание почв до активных температур (на 7–10 дней). Это препятствует развитию корневой системы яровых зерновых культур во втором полуметровом слое почв.

В почвах отрицательных форм рельефа, развивающихся в течение продолжительного времени в условиях дополнительного грунтового или поверхностного увлажнения, сохраняются одни и те же особенности зимнего перераспределения влаги. Основная причина отмечаемой стабильности – положение водоносного горизонта на одних и тех же отметках в течение нескольких десятилетий. Благодаря совокупному влиянию большей, чем на соседних плакорных участках, мощности снежного покрова (что типично для микропонижений: 0,25–0,35 м на третью декаду марта против 0,15–0,28 м) и высокому положению грунтовых вод осенью (на глубине 2,0–3,0 м против 2,5–4,5 м на плакорах) глубина проникновения 0° в почвы отрицательных форм рельефа может быть меньшей, чем в плакорные почвы, на 0,1 м. Поэтому слой криогенной аккумуляции влаги в почвах отрицательных форм отмечается в третьей декаде марта в промежутке глубин от 0,4–0,8 м до 1,8 м (рис. 5). Объем намерзшей влаги составляет, как правило, 30–55 мм, но он на 5–10 мм больше, чем в соседних плакорных почвах. Весенние и раннелетние условия для появления анаэробнозиса и развития проявлений гидроморфизма в слое 0,5–1,0 м почв отрицательных форм фиксируются в течение всего периода полевых наблюдений.

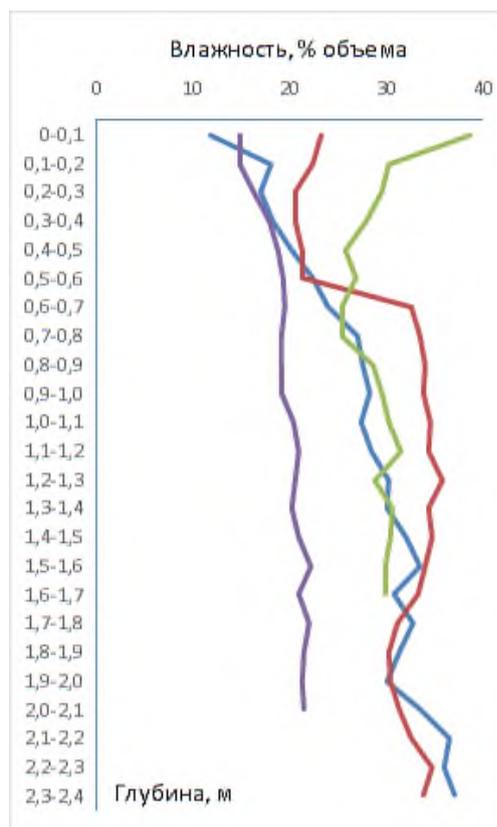


Рисунок 5. Изменение профиля влажности в течение зимнего сезона 2017–2018 гг. Опорный разрез 1.

Условные обозначения:

- - влажность завядания;
 - - наименьшая влагоемкость;
 - - влажность 21.10.2017 г., уровень грунтовых вод – 1,95 м;
 - - влажность 21.03.2018 г., уровень грунтовых вод – 3,04 м;
- суммарная прибавка влаги в слое криогенной аккумуляции – 51 мм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Поскольку степные почвы, используемые в богарном земледелии, характеризуются недостаточными для получения постоянно высоких урожаев сельскохозяйственных культур ресурсами влаги, изыскание путей увеличения этих запасов и рационального их использования сохраняет свою значимость. В глубоко и длительно сезонно промерзающих почвах юга Западной Сибири заметным элементом их водного режима является зимнее передвижение влаги из глубоких слоев грунта в выхолаживающийся слой. Известно, что такое передвижение влаги происходит под влиянием температурного градиента и проявляется в фиксируемых полевыми методами объемах лишь при высокой исходной влажности почвенно-грунтовых толщ под слоем сезонного иссушения. Высокая влажность нижних горизонтов западносибирских степных почв и подпочвенных пород в осенне-зимний промежуток времени обусловлена близким к земной поверхности залеганием водоносного горизонта.

Ишимская степь известна многолетними изменениями уровня грунтовых вод на плакорных участках местности. В течение 1960-х – 2000-х гг. этот уровень в результате хозяйственной деятельности оказался поднят с различных глубин до отметок, превышающих критические (3,9 м). На протяжении 2000-х – 2020-х гг. уровень расположенных выше критической глубины грунтовых вод подвержен межгодовым изменениям, обусловленным суммами атмосферных осадков предыдущего холодного сезона года. Поскольку в течение 2000–2008 гг. преобладали многоснежные зимние сезоны, а в 2009–2022 гг. – малоснежные, грунтовые воды в одних и тех же опорных разрезах в течение первого отрезка времени отмечались в целом выше (на 0,1–0,7 м), чем в последовавший промежуток лет с малоснежными сезонами.

Разная глубина залегания грунтовых вод отразилась на осеннем распределении влаги по профилю плакорных почв Ишимской степи, на пространственном положении слоя криогенной аккумуляции и объеме намерзающей влаги. Выраженные различия в параметрах зимнего передвижения влаги связаны с глубиной залегания грунтовых вод осенью. При положении грунтовых вод на отметках более 4 м, слой криогенной аккумуляции расположен ниже корнеобитаемого слоя по посевам яровых зерновых (0–0,8 м); объем намерзшей в нем влаги составляет, как правило, менее 30 мм, роль этого процесса в устранении послевегетационного дефицита влаги в верхнем метровом слое почв оказывается ничтожной. Поступление влаги на намерзание из нижних слоев пород зоны аэрации компенсируется ее притоком от водоносного горизонта; уровень грунтовых вод от октября к марту понижается до 0,5 м. Если осенью грунтовые воды отмечаются на глубине менее 4 м, их капиллярная кайма присутствует в слое 0–1,0 м, слой криогенной аккумуляции фиксируется в нижней части корнеобитаемого слоя по посевам яровых зерновых (с глубины 0,4–0,8 м), суммарный объем намерзания в нем может достичь 50 мм, в том числе, 25 мм в верхнем метровом слое. Намерзание влаги может на 16% восполнить послевегетационный дефицит влаги в слое 0–1,0 м, однако при этом в слое 0,6–1,0 м снижается пористость аэрации до критических значений и задерживается на 7–10 дней прогревание второго полуметрового слоя почв до активных температур. Снижением пористости аэрации предопределяются благоприятные условия для развития гидроморфизма в нижней части профиля почв. Уровень грунтовых вод в этом случае опускается к завершению зимнего сезона на 0,5–1,0 м.

Почвы отрицательных форм рельефа характеризуются достаточно стабильным положением грунтовых вод на глубинах, превышающих критические, в течение последних четырех десятилетий, поэтому зимнее перераспределение в них влаги характеризуется одними и теми же чертами: положением верхней границы слоя намерзания в нижней части профиля почв (на глубине 0,4–0,8 м), повышенным объемом криогенной аккумуляции влаги по сравнению с соседними плакорными почвами (на 5–10 мм), созданием условий во втором полуметровом слое для развития внутрпочвенного гидроморфизма вследствие морозной аккумуляции влаги.

Ближайшими задачами в изучении зимней миграции влаги являются: уточнение преобладающего тока влаги из нижних слоев к фронту промерзания в почвах Ишимской степи (капиллярного или пленочного); составление прогноза зимнего передвижения почвенной влаги по параметрам окружающей среды (средней температуры воздуха, сумм атмосферных осадков холодного сезона года и др.); выявление особенностей зимнего термоградиентного передвижения влаги в пахотных почвах других регионов юга Западной Сибири и создание общей модели зимней миграции влаги в лесостепных и степных почвах Ишим-Иртышского и Обь-Иртышского междуречных пространств.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 24-26-00104).

ЛИТЕРАТУРА

- Горшенин К.П. Почвы южной части Сибири. Москва: АН СССР, 1955. 590 с.
- Градобоев Н.Д., Прудникова В.М., Сметанин И.С. Почвы Омской области. Омск: Омское кн. изд-во, 1960. 374 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.
- Кравцов Ю.В. Черноземы Ишимской степи. Новосибирск: НГПУ, 2004. 213 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. Новосибирск: НГПУ, 2014. 252 с.
- Кравцов Ю.В. Прогноз развития почв Ишимской степи на основе ретроспективного анализа // Пути эволюционной географии: материалы II Всероссийской научной конференции (Москва, 22–25 ноября 2021 г.). Москва: Институт географии РАН, 2021. Вып. 2. С. 519–523.
- Кравцов Ю.В. Многолетняя динамика уровня грунтовых вод в почвах Ишимской степи // Почвы и окружающая среда [Электронный ресурс]: Сборник научных трудов Всероссийской научной конференции с международным

участием, посвященной 55-летию Института почвоведения и агрохимии СО РАН (Новосибирск, 2–6 октября 2023 г.). Новосибирск: ИПА СО РАН, 2023. С. 454–458. DOI: <https://doi.org/10.31251/conf1-2023>.

Панфилов В.П. Физические свойства и водный режим почв Кулундинской степи. Новосибирск: Наука, 1973. 260 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. Новосибирск: Наука, 1988. С. 47–57.

Роде А.А. Водный режим почв и его регулирование. Москва: АН СССР, 1963. 119 с.

Сеньков А.А. Водный режим гидроморфных и полугидроморфных почв Кулунды при промерзании // О почвах Сибири. Новосибирск: Наука, 1978. С. 187–191.

Сеньков А.А. Галогенез степных почв (на примере Ишимской равнины). Новосибирск: Наука, 2004. 152 с.

Танасиенко А.А. Специфика эрозии почв в Сибири. Новосибирск: СО РАН, 2003. 176 с.

Толковый словарь по почвоведению. Москва: Наука, 1975. 288 с.

Топографическая карта масштаба 1 : 1 000 000: лист I-33-48. Москва: ГУГК, 1965а.

Топографическая карта масштаба 1 : 1 000 000: лист I-33-44. Москва: ГУГК, 1965б.

Поступила в редакцию 19.02.2024

Принята 18.04.2024

Опубликована 23.04.2024

Сведения об авторе:

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

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.



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

The influence of groundwater level long-term dynamics on winter moisture redistribution in arable soils of the Ishim steppe

© 2024 Yu. V. Kravtsov

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

The aim of the study was to establish the influence of long-term dynamics of the groundwater level on the winter redistribution of moisture in arable soils of the Ishim steppe.

Location and time of the study. The Ishim-Irtysh steppe interfluvium (Ishim steppe, Russia), 1986–1989 and 2002–2024.

Methods. Soil samples were collected during soil-hydrological field observations from the reference pits of arable soils. The soil and subsoil moisture content was determined by thermostat-weighing /in samples collected in the pre-winter period (the second - third decades of October) and at the end of the winter season (the third decade of March). The depth of the groundwater table was measured in the hand-drilled simultaneous with soil sampling for moisture measurement. The layer of cryogenic accumulation and the freezing moisture volume were determined by comparing moisture profiles in mid-October and in the third decade of March. Snow surveying was carried out in the third decade of March. The penetration depth of 0°C temperature was determined using exhaust thermometers.

Results. Within the upland areas, during the second half of the 20th century the aquifer rose from various depths to the levels above the critical level. The economic activity was the main reason for the rise. In the early decades of the 21st century, as the groundwater table was above the critical depth, the groundwater level in summer and autumn began to be predetermined by the amounts of precipitation over the previous cold season of the year.

The peculiarities of the winter redistribution of moisture in arable soils were found to be largely determined by the depth of groundwater in the autumn season. If in the upland soils the groundwater table was located in autumn at a depth of more than 4 m, which was typical for the 1980s, a layer of cryogenic moisture accumulation was formed below the horizons of intense and complete desiccative drying for spring grain crops, from a depth of 0.8 m. The moisture freezing volume did not exceed 30 mm. Migrated moisture practically did not participate in replenishing the post-vegetation moisture deficit in the upper 1-meter-thick layer of soil. If the groundwater in the second and third decades of October was detected at a depth of less than 4 m, which is

typical for upland areas in the 21st century, a layer of cryogenic accumulation can be traced from a depth of 0.4–0.8 m, the volume of freezing moisture can reach 50 mm, and 25 mm in the top 1-meter layer. The frozen moisture in the top meter layer helps reducing the post-vegetation deficit, but promotes conditions for anaerobiosis in the second half-meter soil layer and acts as an “island of cold,” delaying the soil warming in spring to active temperatures.

In soils with negative relief forms, the groundwater level during the period of field survey exceeded the critical level. Therefore, specifics of winter moisture profile redistribution in were similar to the established characteristics of this phenomenon in upland soils during the current millennium.

Conclusions. The groundwater level in the soil and subsoils of the Ishim steppe uplands showed long-term dynamics under the influence of anthropogenic as well as natural factors over the past twenty years. The autumn depth of the groundwater table determines specifics of winter moisture redistribution in the arable soils of plakors: the higher the level, the greater the amount of moisture freezing is fixed, and the closer the cryogenic accumulation layer is located to the daytime surface.

Keywords: critical depth; cryogenic accumulation; root layer; soil-hydrological horizon; freezing of moisture; aeration porosity.

How to cite: Kravtsov Yu.V. The influence of long-term dynamics of groundwater levels on the winter redistribution of moisture in arable soils of the Ishim steppe // *The Journal of Soils and Environment*. 2024. 7(1). e250 (in Russian with English abstract). DOI: [10.31251/pos.v7i1.250](https://doi.org/10.31251/pos.v7i1.250)

FUNDING

The study was financially supported by the Russian Science Foundation (project No. 24-26-00104).

REFERENCES

- Gorshenin K.P. Soils of the southern part of Siberia. Moscow: Academy of Sciences of the USSR, 1955. 590 p. (in Russian).
- Gradoboev N.D., Prudnikova V.M., Smetanin I.S. Soils of the Omsk region. Omsk: Omsk Publishing House, 1960. 374 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).
- Kravtsov Yu.V. Chernozems of the Ishim steppe. Novosibirsk: NGPU, 2004. 213 p. (in Russian).
- Kravtsov Yu.V. Rise of ground water in the Ishim steppe. *Contemporary Problems of Ecology*. 2009. Vol. 2. No. 6. P. 655–659. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1995425509060265>.
- Kravtsov Yu.V. Water regime of soils of the Ishim steppe. Novosibirsk: NSPU, 2014. 252 p. (in Russian).
- Kravtsov Yu.V. Forecast of soil development in the Ishim steppe based on retrospective analysis. In book: Paths of evolutionary geography. Proceedings of the II All-Russian scientific conference (Moscow, November 22–25, 2021). Moscow: Institute of Geography RAS, 2021. Vol. 2. P. 519–523. (in Russian).
- Kravtsov Yu.V. Long-term dynamics of the groundwater level in the soils of the Ishim steppe. In book: Soils and Environment [Electronic resource]: Collection of scientific papers of the All-Russian scientific conference with international participation, dedicated to the 55th anniversary of the Institute of Soil Science and Agrochemistry SB RAS (Novosibirsk, October 2–6, 2023). Novosibirsk: SSA SB RAS, 2023. P. 454–458. DOI: <https://doi.org/10.31251/conf1-2023>. (in Russian).
- Panfilov V.P. Physical properties and water regime of soils of the Kulunda steppe. Novosibirsk: Nauka Publ., 1973. 260 p. (in Russian).
- Panfilov V.P., Slesarev I.V., Kudryashova S.Ya., Senkov A.A. Modern hydrological state of soils and underlying rocks. In book: Chernozems: properties and features of irrigation. Novosibirsk: Nauka Publ., 1988. P. 47–57. (in Russian).
- Rode A.A. Water regime of soils and its regulation. Moscow: USSR Academy of Sciences, 1963. 119 p. (in Russian).
- Senkov A.A. Water regime of hydromorphic and semi-hydromorphic soils of Kulunda during freezing. In book: On soils of Siberia. Novosibirsk: Nauka Publ., 1978. P. 187–191. (in Russian).
- Senkov A.A. Halogenesis of steppe soils (on the example of the Ishim plain). Novosibirsk: Nauka Publ., 2004. 152 p. (in Russian).
- Tanasienko A.A. Specifics of soil erosion in Siberia. Novosibirsk: SB RAS, 2003. 176 p. (in Russian).
- Explanatory dictionary of soil science. Moscow: Nauka Publ., 1975. 288 p. (in Russian).
- Topographic map of scale 1 : 1 000 000: sheet I-33-48. Moscow: GUGK, 1965a. (in Russian).

Topographic map scale 1 : 1 000 000: sheet I-33-44. Moscow: GUGK, 19656. (in Russian).

Received 19 February 2024

Accepted 18 April 2024

Published 23 April 2024

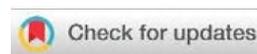
About the author:

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

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/)



Картографические модели температурных полей почв степных котловин Хакасии и Тывы на основе совместного анализа наземных и спутниковых данных

© 2024 С. Я. Кудряшова ¹, А. С. Чумбаев ¹, С. С. Курбатская ²

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

²ФГБУН Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН, улица Интернациональная, 117А, Кызыл, 667007, Россия. E-mail: ana.kurbatskaya@mail.ru

Цель исследования. Обоснование возможности использования количественных характеристик температурного режима почв, полученных на основе совместного анализа наземного и спутникового мониторинга для создания картографических моделей типологических единиц почвенно-биоклиматической зональности степных котловин Хакасии и Тывы.

Место и время проведения. Отработка методических положений выделения границ температурных полей проведена в период 2019–2022 гг. на примере типологических единиц почвенного покрова Алтае-Саянского региона, включающего разнообразие степей Чулымо-Енисейского и Минусинского прогибов, Турано-Уюкской, Центрально-Тувинской, Убсу-Нурской котловин. Ключевые участки выбраны с учетом принципов ландшафтного районирования, которые позволяют распознавать, классифицировать и картографировать ландшафтно-дифференцирующие факторы, компоненты ландшафта, региональную ландшафтную структуру в целом и ее динамические особенности.

Методы. Наземный автоматизированный мониторинг воздуха и почв был организован с использованием специализированного регистратора температуры DS-1921G “Thermodrone” с учетом показателей, отражающих генетическое единство типов климата Алтае-Саянского региона. Для проведения ретроспективного анализа, статистической обработки и визуализации данных MODIS, использовался созданный в ИВТ СО РАН программно-алгоритмический инструментальный, базирующийся на новой технологии доступа к архиву спутниковых данных, реализованной с использованием СУБД PostgreSQL с дополнительным модулем, который предназначен для прямого доступа к файловому архиву данных без необходимости предварительного копирования и преобразования формата данных для СУБД.

Основные результаты. На основе совместного анализа количественных показателей температурного режима воздуха и почвы, полученных с использованием наземных автоматизированных измерительных комплексов и спутниковых данных, создана серия картографических моделей, отражающих особенности температурных полей типологических единиц почвенно-биоклиматической зональности Алтае-Саянского региона. Интерпретация выделения типологических единиц структурной организации почвенного покрова представлена на основе статистического анализа совмещения границ и информационного содержания контуров почвенного покрова и границ температурных полей – дневных и ночных температур, а также разницы температур двух скомпилированных серий, рассчитанных за 16-ти летний период. Новизна подхода заключается в том, что картографические модели температурных полей, созданные на основе количественных показателей температур, обладают достаточной информативностью, позволяющей устанавливать взаимосвязи температурного режима с другими характеристиками объектов природной среды и подойти к решению проблемы выделения и типологии почвенно-экологических границ.

Заключение. Картографические модели температурных полей, полученные в результате совместного анализа наземных и спутниковых данных, обладают достаточной информативностью в отношении энергетики почвообразовательных процессов и могут быть использованы для оценки термических условий почв малоисследованных и труднодоступных территорий Алтае-Саянского региона.

Ключевые слова: степные котловины; температурные поля почв; картографическое моделирование; наземный и спутниковый мониторинг.

Цитирование: Кудряшова С.Я., Чумбаев А.С., Курбатская С.С. Картографические модели температурных полей почв степных котловин Хакасии и Тывы на основе совместного анализа наземных и спутниковых данных // Почвы и окружающая среда. 2024. Том 7. № 1. e240. DOI: [10.31251/pos.v7i1.240](https://doi.org/10.31251/pos.v7i1.240)

ВВЕДЕНИЕ

В исследованиях, связанных с созданием методологических основ изучения пространственной организации почвенного покрова и его картографирования с использованием дистанционных

методов, одной из наиболее важных задач является проблема выделения и типологии почвенно-экологических границ. Разработка методов выделения структурных единиц почвенного типологического разнообразия и теоретическое обоснование критериев выделения контурных границ особенно актуальны для объективного отображения почвенного покрова территорий с высокой сезонной динамичностью развития растительности, которая значительно снижает индикационные возможности растительного покрова для определения компонентного состава или преобладающего типа почв.

Почвенно-экологические границы могут рассматриваться как функциональные, отображающие определенные почвенные процессы, или факторные, которые проводятся по одному или группе факторов почвообразования (Корсунов и др., 2002). Одним из важнейших факторов формирования процессных и функциональных почвенно-экологических границ является температурный режим почв, характеризующий, совместно с гидрологическим режимом, общий энергетический уровень почвообразования. Температурное поле почв представляет собой совокупность значений температуры в точках пространственной области и может рассматриваться в качестве ведущего фактора структурно-функциональной организации почвенного покрова.

Для целей дистанционного тематического картографирования используются свойства почв, которые тесно коррелируют с экологическими характеристиками окружающей среды и обусловлены действием факторов почвообразования (Minasny, McBratney, 2016; Arrouays et al., 2020; Sekertekin, Bonafoni, 2020; Galve et al., 2022). В наиболее полном виде факторы, определяющие свойства почв в определенной точке исследуемого пространства, отражены в модели SCORPAN – почвенной пространственно предсказывающей функции, которая предполагает, что одинаковому сочетанию почвообразующих факторов-предикторов соответствуют почвы сходного генезиса, а границы почвенных структур обусловлены изменением факторов дифференциации почвенного покрова. Выделение наиболее информативных предикторов осуществляется с использованием подходов педотрансферных методов, которые позволяют рассчитывать педотрансферные функции – уравнения связи, описывающие функциональные соотношения базовых почвенных свойств и характеристик почвенного географического пространства (Bouma, 1989; Pachepsky, Rawals, 1999; McBratney et al., 2002; Shein, Arkhangel'skaya, 2006; Paradian et al., 2018). Основное отличие данной методологии состоит в том, что по совокупности выбранных количественных почвенно-экологических показателей можно перейти к ее таксономической характеристике. Такой подход позволяет по совокупности однородных почвообразующих факторов-предикторов пространственно разделять ареалы почв и проводить между ними контурные границы.

В этой связи, целью данного исследования являлось обоснование возможности использования количественных характеристик температурного режима почв, полученных на основе совместного анализа наземного и спутникового мониторинга для создания картографических моделей типологических единиц почвенно-биоклиматической зональности сухостепных котловин Хакасии и Тывы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Наземный автоматизированный мониторинг воздуха и почвы был организован с использованием автономного регистратора температуры DS-1921G “Thermochron”, с учетом показателей, отражающих генетическое единство типов климата Алтае-Саянского региона. Для фиксации температуры воздуха автономный регистратор был установлен на высоте 2 м от поверхности почвы в условиях, исключающих прямое радиационное воздействие. Динамика изменения температур на поверхности почвы и по горизонтам почвенного профиля фиксировалась регистраторами в течение года с интервалом 4 часа. В результате выполненных наблюдений был получен большой объем фактических данных, который использовался в качестве основы для расчета термических ресурсов температурных полей и выявления их временных трендов (Кудряшова и др., 2018; Мамаш и др., 2023). Для проведения ретроспективного анализа, статистической обработки и визуализации данных MODIS использовался созданный в ИВТ СО РАН оригинальный программно-алгоритмический инструментарий, базирующийся на новой технологии доступа к архиву спутниковых данных, реализованной с использованием СУБД PostgreSQL с дополнительным модулем (Синявский и др., 2016; Синявский, Рылов, 2018). Этот модуль предназначен для прямого доступа к файловому архиву данных без необходимости предварительного копирования и преобразования формата данных для СУБД. Он реализует прозрачное отображение файлового архива спутниковых снимков в виртуальные таблицы базы данных. Модуль позволяет выполнять произвольные SQL-запросы к данным файлового архива, при этом планировщик запросов

оптимизирует их выполнение на основе доступных метаданных, а применяемые для выполнения вычислений алгоритмы предусматривают работу с объемами информации, превосходящими емкость оперативной памяти сервера СУБД. Тематическая обработка космических снимков была проведена с помощью предложенных авторами оригинальных непараметрических методов и технологий сегментации спутниковых изображений, позволяющих учитывать как спектральные и пространственные признаки, так и данные наземных наблюдений.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Отработка методических положений выделения границ температурных полей проведена на примере типологических единиц почвенного покрова Алтае-Саянского региона, включающего разнообразие степей Чулымо-Енисейского и Минусинского прогибов, Турано-Уюкской, Центрально-Тувинской и Убсу-Нурской котловин. Ключевые участки выбраны с учетом принципов ландшафтного районирования, которые позволяют распознавать, классифицировать и картографировать ландшафтно-дифференцирующие факторы, компоненты ландшафта, региональную ландшафтную структуру в целом и ее динамические особенности. В качестве источников информации использовались космические снимки Landsat 8/9 (рис. 1). Тематические почвенные и климатические карты использовались как вспомогательные при дешифрировании космических снимков.

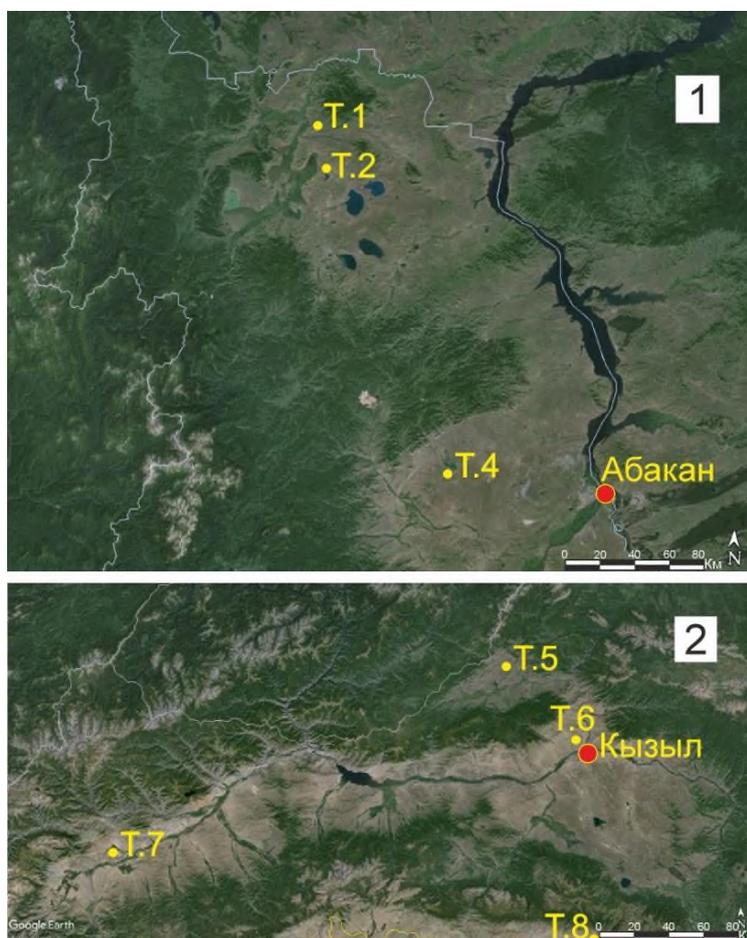


Рисунок 1. Местоположение ключевых участков в степных котловинах Республики Хакасия (1) и Республики Тыва (2).

Межгорные котловины Хакасии и Тывы расположены в восточном секторе Алтае-Саянской горной области в следующей последовательности с севера на юг – Северо-Минусинская, Южно-Минусинская, Турано-Уюкская, Центрально-Тувинская и Убсу-Нурская. Высотные отметки днищ котловин увеличиваются в южном направлении от 300 до 500 м над уровнем моря в котловинах Хакасии и от 700 до 900 м над уровнем моря в котловинах Тывы. В этом же направлении увеличивается континентальность климата – от наиболее мягких климатических условий в Северо-Минусинской котловине, до наиболее сурового типа термического режима в Убсу-Нурской.

Особенности распространения и специфика формирования термических условий степей левобережной части Енисея, Минусинской котловины (Хакасия) связаны с их расположением между горными сооружениями Кузнецкого Алатау, Восточного и Западного Саяна (рис. 2).

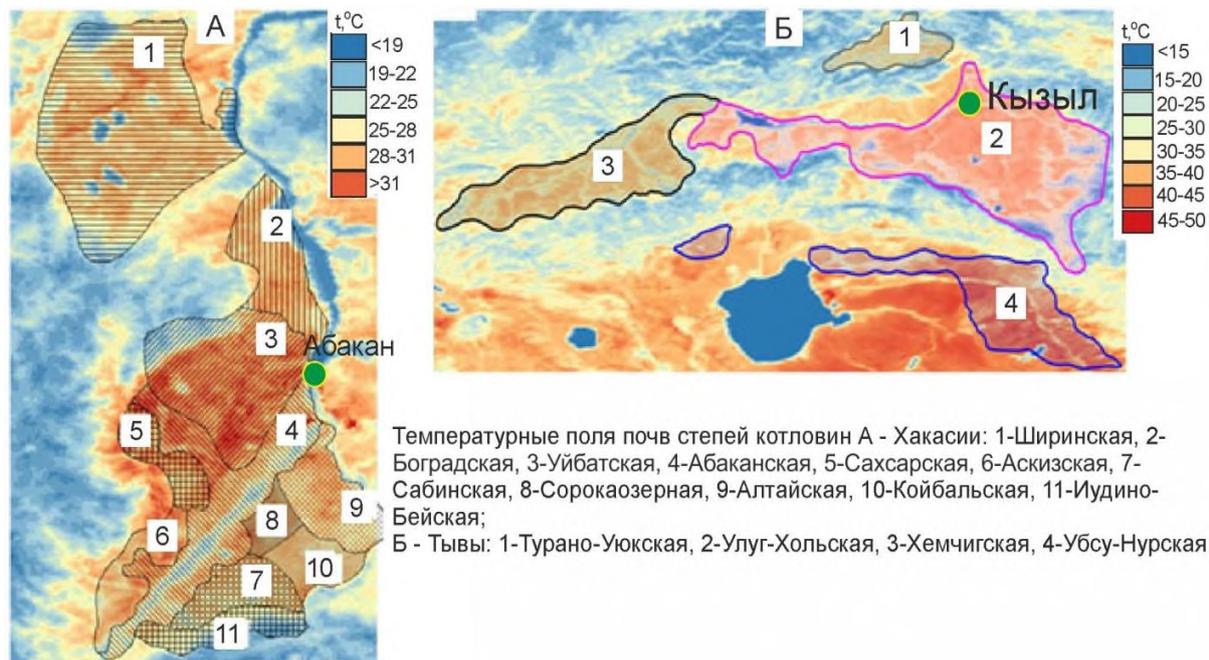


Рисунок 2. Карта-схема температурных полей почв степных котловин Республики Хакасия (А) и Республики Тыва (Б).

Контрастность климатических режимов воздуха и почв в котловинах Хакасии формируется в зависимости от выраженности направления переноса влаги, которое в восточном секторе Алтае-Саянской горной области имеет западную, сменяющуюся на северо-западную ориентацию (табл. 1).

Таблица 1

Суммы температур воздуха и почв степных котловин Хакасии
 (сумма температур, °С / количество дней с данной температурой)

Температуры	Сумма температур воздуха	Сумма температур почвы по глубинам (см)				
		0	10	20	30	50
Ужуро-Копьевская луговая степь, с. Копьево, т.1 (54°56'19,6" с.ш., 89°52'47,1" в.д.).						
все	424,7	908,2	791,8	940,3	888,3	989
≥10°	1461,5/89	1674,5/100	1427,2/90	1400,7/90	1205,3/77	1202,9/83
≥5°	1755,3/131	1917,3/133	1742,8/133	1711,8/132	1571,8/123	1508,5/126
>0°	1845,6/168	2026,7/176	1827,2/173	1819,3/183	1706,3/179	1631,8/177
≤0°	-1420,9/165	-1118,5/157	-1035,3/160	-879/150	-817,9/154	-642,8/156
среднегодовая	1,3	2,7	2,4	2,8	2,7	3,0
Ширинская озерно-котловинная степь, оз. Тус, т.2 (54°45'17,2" с.ш., 89°57'17,9" в.д.).						
все	430,5	1076,5	1146,2	872,3	1121,8	915,3
≥10°	1558,8/90	1875,1/105	1707,9/100	1428,1/90	1359,9/87	1075,6/76
≥5°	1859,6/130	2161/144	2020,7/141	1760,9/136	1721/135	1422,8/124
>0°	1974,5/169	2244,2/181	2127,2/185	1846/172	1842,5/183	1554,3/177
≤0°	-1544/164	-1168,2/152	-980/148	-973,7/161	-720,8/150	-639/156
среднегодовая	1,3	3,2	3,4	2,6	3,4	2,7
Уйбатская равнинно-холмистая солонцеватая степь, оз. Улуг-Холь, т.4 (53°47'30,1" с.ш., 90°38'39,8" в.д.).						
все	371,7	322	283	390,6	389,4	531,3
≥10°	1630,8/95	1785,7/105	1457,8/94	1363,7/90	1168,5/80	1091/79
≥5°	1927,1/135	2059,4/142	1732,8/130	1674,9/132	1523/127	1407,8/121
>0°	2010,1/170	2118,6/164	1829,3/170	1767,4/169	1634,9/166	1553,8/174
≤0°	-1638,4/163	-1796,6/169	-1546/163	-1367,8/164	-1245,5/167	-1022,5/159
среднегодовая	1,1	1,0	0,9	1,2	1,2	1,6

Климатические условия, как комплекс экологических факторов, оказывают непосредственное влияние на формирование температурных полей почвенного покрова котловинных степей Хакасии. В районах Ужуро-Копьевской и Ширинской степей, в которых средняя годовая температура воздуха составляет 1,3°, продолжительность безморозного периода – 168 дней и $\Sigma t \geq 10^\circ\text{C} = 1461^\circ$ и 1558°, соответственно, преобладают черноземы южные и обыкновенные, занимающие от 14 до 34% площади котловин. В Уйбатской степи, расположенной в непосредственной близости с восточными предгорьями Кузнецкого Алатау, средняя годовая температура воздуха составляет -1,1°, продолжительность безморозного периода – 170 дней и $\Sigma t \geq 10^\circ\text{C} = 1630^\circ$. Поэтому здесь находится наиболее ксерофильное ядро степной растительности и формируются малопродуктивные солонцовые почвы. Температурный режим почв степных котловин Хакасии определяется не только температурой воздуха, но и наличием растительности на поверхности изучаемых почв, особенно в теплый период. Так, обращает на себя внимание существенный перепад в суммах температур $\geq 10^\circ$ между слоями 10–20 и 20–30 см и отсутствие разницы этих значений между слоями 20–30 и 30–50 см в почвах Ужуро-Копьевской луговой степи (см. табл. 1). Поверхность почв в исследуемой степи Хакасии покрыта высокостебельной травяной луговой растительностью, которая является естественным регулятором температурного режима для почв региона. Данная степь самая северная среди других исследуемых степей Хакасии и сумма положительных температур здесь ниже, чем в более южных степях региона. Совокупность этих двух факторов оказывает более значительное воздействие на температурный режим верхнего 30-сантиметрового слоя, чем на нижележащие слои.

На территории Тывы выделяются четко различающиеся по климатообразующим факторам и термическим условиям почвообразования Турано-Уюкская, Центрально-Тувинская и Убсу-Нурская степные котловины. Температурные поля почв котловин Тывы могут рассматриваться как показатели различий в комплексе климатических условий, структурной организации и функционирования почвенного покрова (табл. 2).

Таблица 2

Суммы температур воздуха и почв степных котловин Тывы
(сумма температур, $^\circ\text{C}$ / количество дней с данной температурой)

Температура	Сумма температур воздуха	Сумма температур почвы по глубинам (см)			
		0	10	20	50
Турано-Уюкская котловина, Туран, т.5 (52°08'18,8" с.ш., 93°49'25" в.д.)					
все	-752,3	-85,7	-25,5	-33,5	42,6
$\geq 10^\circ$	1572,8/95*	1754,1/96	1470,3/88	1284,9/82	908,9/70
$\geq 5^\circ$	1768,5/121	1951,4/124	1726/124	1536,5/116	1210,3/112
$> 0^\circ$	1874/160	2026,5/152	1822,8/161	1660/163	1312,7/156
$\leq 0^\circ$	-2626,3/169	-2112,3/177	-1843,8/168	-1693,5/166	-1270,3/171
среднегодовая	-2,3	-0,3	-0,1	-0,1	0,1
Улуг-Хемская котловина, Кызыл, т.6 (51°44'36,5" с.ш., 94°19'34,4" в.д.)					
все	121,5	787,3	1126,7	598,3	923
$\geq 10^\circ$	2043,3/107	2327,3/120	2151,3/121	1995,1/112	1730,1/107
$\geq 5^\circ$	2349,9/149	2603,5/156	2458,9/163	2268,9/148	2083,8/156
$> 0^\circ$	2440,7/180	2672,4/183	2515,4/192	2350,5/179	2157/183
$\leq 0^\circ$	-2319,2/149	-1882,5/146	-1752,3/137	-1388,8/150	-1234/126
среднегодовая	0,4	2,4	3,4	1,8	2,8
Хемчикская котловина, Ак-Довурак, т.7 (51°13'0,2" с.ш., 90°31'38" в.д.)					
все	-203,3	567,2351,8	351,8	185,1	596,3
$\geq 10^\circ$	2034,2/110	2484,9/125	2238,1/121	2155,7/118	2117,8/117
$\geq 5^\circ$	2320,7/148	278,4/154	2450,5/149	2399,7/150	2376,7/151
$> 0^\circ$	2383,6/174	2767/177	2511,3/175	2459,7/173	2440,3/170
$\leq 0^\circ$	-2586,9/155	-2199,8/152	-2159,5/154	1994,9/156	-1844/159
среднегодовая	-0,6	1,7	1,1	0,6	1,8
Убсу-Нурская котловина, оз. Тере-Холь, т.8 (50°15'23,4" с.ш., 95°0,2'32,3" в.д.)					
годовая	-653,1	794	579,5	658,6	882,8
$\geq 10^\circ$	2207/125	2575/132	2400/133	2320/131	2226/128
$\geq 5^\circ$	2407/151	2755/155	2522/150	2480/154	2448/158
$> 0^\circ$	2461/169	2830/182	2603/179	2542/179	2496/179
$\leq 0^\circ$	-3114/172	-2035/159	-2024/162	-1884/162	-1613/162
среднегодовая	-1,9	2,3	1,7	1,9	2,6

Турано-Уюкская котловина, расположенная на высоте 700–900 м н.у.м. по основным показателям климатического режима – средней годовой температуре воздуха ($-2,3^{\circ}$), продолжительности безморозного периода (160 дней) и $\Sigma t_{\geq 10^{\circ}\text{C}}=1573^{\circ}$ приближается к условиям зоны засушливых степей, в которых под разреженными разнотравно-полынно-злаковыми ассоциациями формируются черноземы обыкновенные или южные.

Термические условия Улуг-Хемской и Хемчикской котловин, днища которых имеют отметки 600–800 м н.у.м. характеризуются более высокой средней годовой температурой воздуха ($-0,4^{\circ}$), более длительной продолжительностью безморозного периода (180 дней) и сравнительно схожими $\Sigma t_{\geq 10^{\circ}\text{C}}=2043^{\circ}$ и 2034° , соответственно. В Улуг-Хемской котловине в зависимости от гидротермических условий под разнотравно-злаковыми ассоциациями степной растительности формируются черноземы обыкновенные и южные. В Хемчикской котловине под разреженными полынно-злаковыми ассоциациями сухих степей преобладают почвы каштанового типа. Убсу-Нурская котловина выделяется резкой континентальностью климата – низким атмосферным увлажнением и высокими тепловыми ресурсами лета: средняя годовая температура воздуха ($-1,9^{\circ}$), продолжительность безморозного периода – 169 дней и $\Sigma t_{\geq 10^{\circ}\text{C}}=2207^{\circ}$, которые создают режим полупустынной зоны с каштановыми почвами и псаммоземами.

Интерпретация выделения типологических единиц структурной и функциональной организации почвенного покрова степных котловин Хакасии представлена на основе статистического анализа совмещения границ и информационного содержания контуров почвенного покрова и температурных полей, полученных на основе анализа спутниковых данных дневных, ночных температур и разницы температур, полученных путем вычитания двух скомпилированных серий (рис. 3).

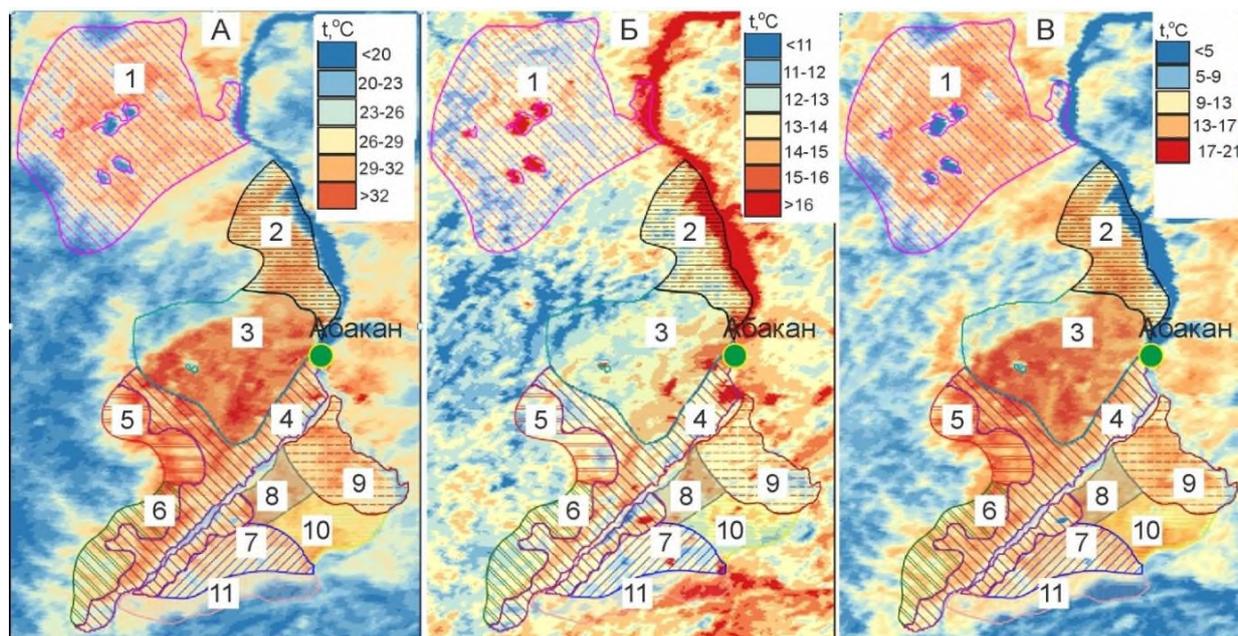


Рисунок 3. Картографические модели температурных полей почв степных котловин Хакасии, созданные на основе анализа спутниковых данных: А) – дневных, Б) – ночных и В) – разницы дневных и ночных температур, полученных путем вычитания двух скомпилированных серий. Обозначение котловин см. рис. 2.

Полученные картографические модели дают отчетливое представление о границах контуров температурных полей типологических единиц почвенного покрова Хакасии, функционирование которых осуществляется в широком диапазоне температур, как крупных единиц почвенного покрова, таких как Ширинская или Уйбатская котловины, так и занимающих небольшие площади – Койбальская или Сорокаозерная, но имеющих самостоятельное экологическое значение. Обращает на себя внимание значительная разница в выделении площадей почвенных контуров и их температурных полей в котловинах сухих (опустыненных) степей, полученных на основе анализа спутниковых данных, как дневных, так и ночных температур.

Пространственное распространение температурных полей степных котловин Тывы имеет юго-западное направление и обусловлено особенностями макрорельефа (рис. 4).

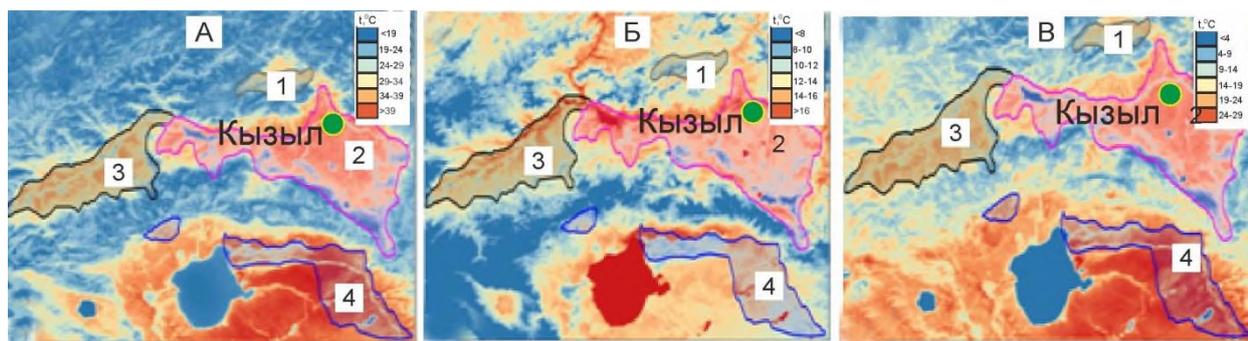


Рисунок 4. Картографические модели температурных полей почв степных котловин Тывы, созданные на основе анализа спутниковых данных: А) – дневных, Б) – ночных и В) – разницы дневных и ночных температур, полученных путем вычитания двух скомпилированных серий. Обозначение котловин см. рис. 2.

В котловинах Тывы, отличающихся аридизацией климата и высокой степенью разнообразия характеристик почвенного географического пространства, полученные картографические модели температурных полей могут быть использованы для выявления пространственных и временных градиентов термических ресурсов в масштабе крупных и локальных единиц почвенного покрова. По условиям теплообеспеченности и континентальности климата, которые создают режим полупустынной зоны с каштановыми почвами и псаммоземами, особенно выделяется Убсу-Нурская котловина с резкой континентальностью. Модели температурных полей дают возможность для получения дополнительной информации о природных комплексах, формирование и функционирование которых осуществляется в условиях ультравысоких или ультранизких значений температур.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Картографические модели температурных полей, полученные в результате совместного анализа наземных и спутниковых данных, обладают достаточной информативностью в отношении энергетики почвообразовательных процессов и могут быть использованы для оценки термических условий почв малоисследованных и труднодоступных территорий Алтае-Саянского региона. Новизна подхода заключается в том, что картографические модели температурных полей почв, созданные на основе количественных показателей температурного режима, обладают достаточной информативностью, позволяющей устанавливать взаимосвязи с другими характеристиками объектов природной среды и подойти к решению проблемы выделения границ температурных полей типологических единиц почвенного покрова. Пространственное распространение температурных полей с учетом актуальных тенденций изменения термических ресурсов, может быть использовано для корректирования контурных границ структурных единиц почвенного покрова.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Исследования были выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № 121031700316-9).

ЛИТЕРАТУРА

Корсунов В.М., Красеха Е.Н., Ральдин Б.Б. Методология почвенно-географических исследований и картографии почв. Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2002. 232 с.

Кудряшова С.Я., Чумбаев А.С., Пестунов И.А., Безбородова А.Н., Курбатская С.С., Рылов С.А., Синявский Ю.Н. Применение данных дистанционного зондирования и наземного автоматизированного мониторинга температурных полей почв для картографического моделирования почвенного покрова // Новые методы и результаты исследований ландшафтов в Европе, Центральной Азии и Сибири. В 5-ти томах. Том III. Москва: Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии имени Д.Н. Прянишникова, 2018. С. 238–242. DOI: <https://doi.org/10.25680/1463.2018.67.60.243>.

Мамаш Е.А., Пестунов И.А., Ермаков Н.Б., Кудряшова С.Я., Чумбаев А.С. Анализ многолетней динамики температурного режима Чуйской межгорной котловины (Республика Алтай) на основе данных LANDSAT //

Обработка пространственных данных в задачах мониторинга природных и антропогенных процессов (SDM-2023) [Электронный ресурс]. Сборник трудов всероссийской конференции с международным участием (Бердск, 22–25 августа 2023 г.). Новосибирск: ФИЦ ИВТ, 2023. С. 294–304. DOI: <https://doi.org/10.25743/sdm.2023.57.96.050>.

Синявский Ю.Н., Пестунов И.А., Дубровская О.А., Рылов С.А., Мельников П.В., Ермаков Н.Б., Полякова М.А. Методы и технология сегментации мультиспектральных изображений высокого разрешения для исследования природных и антропогенных объектов // *Вычислительные технологии*. 2016. Т. 21. № 1. С. 127–140.

Синявский Ю.Н., Рылов С.А. Экспериментальное сравнение непараметрических алгоритмов кластеризации для сегментации мультиспектральных изображений // *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2018. Т. 1. № 4. С. 109–114.

Arrouays D., McBratney A., Bouma J., Libohova Z., Richer-de-Forges A., Morgan L., Roudier P., Poggio L., Mulder V. Impressions of digital soil maps: The good, the not so good, and making them ever better // *Geoderma Regional*. 2020. Vol. 20. P. 1–7. E00255. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00255>.

Bouma J. Using soil survey data for quantitative land evaluation // *Advances in Soil Science: part of the book series / B.A. Stewart (eds)*. New York: Springer, 1989. Vol. 9. P. 177–213. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4612-3532-3_4.

Galve J., Sanchez J., Garcia-Santos V., Gonzalez-Piqueras J., Calera A., Villodre J. Assessment of Land Surface Temperature Estimates from Landsat 8-TIRS in A High-Contrast Semiarid Agroecosystem. Algorithms Intercomparison // *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14. No. 8. P. 843. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs14081843>.

McBratney A.B., Minasny B., Cattle S., Vervoort R. From Pedotransfer functions to soil inference systems // *Geoderma*. 2002. Vol. 109. Iss. 1–2. P. 41–73. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(02\)00139-8](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(02)00139-8).

Minasny B., McBratney A.B. Digital Soil mapping: A brief history and some lessons // *Geoderma*. 2016. Vol. 264. P. 301–311. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.07.017>.

Pachepsky Ya.A., Rawls W.J. Accuracy and reliability of pedotransfer functions as affected by grouping soils // *Soil Science Society of America Journal*. 1999. Vol. 63. Iss. 6. P. 1748–1757. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj1999.6361748x>.

Paradian J., Morris J., Minasny B., McBratney A.B. Pedotransfer Function and Soil Inference System // *Pedometrics*. 2018. P. 195–220. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-63439-5_7.

Sekertekin A., Bonafoni S. Land Surface Temperature Retrieval from Landsat 5, 7, and 8 over Rural Areas: Assessment of Different Retrieval Algorithms and Emissivity Models and Toolbox Implementation // *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12. No. 2. P. 294. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12020294>.

Shein E.V., Arkhangel'skaya T.A. Pedotransfer functions: State of the art, problems, and outlooks // *Eurasian Soil Science*. 2006. Vol. 10. No. 10. P. 1089–1099. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229306100073>.

Поступила в редакцию 13.12.2023

Принята 17.04.2024

Опубликована 28.04.2024

Сведения об авторах:

Кудряшова Светлана Яковлевна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории почвенно-физических процессов ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск, Россия); kudryashova@issa-siberia.ru

Чумбаев Александр Сергеевич – кандидат биологических наук, заведующий лабораторией почвенно-физических процессов ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск, Россия); chumbaev@issa-siberia.ru

Курбатская Светлана Суруновна – доктор географических наук, заведующая лабораторией геоботаники и экологии почв ФГБУН Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН (г. Кызыл, Россия); lane.kurbatskaya@mail.ru

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.



Статья доступна по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License

Cartographic models of soil temperature fields in the steppe basins of Khakassia and Tuva based on joint analysis of temperature monitoring ground and satellite data

© 2024 S. Ya. Kudryashova ¹, A. S. Chumbaev ¹, S. S. Kurbatskaya²

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

²Tuvian Institute for Exploration of Natural Resources of Siberian Branch of RAS, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Internatsionalnaya street 117A, Kyzyl, Russia. E-mail: lana.kurbatskaya@mail.ru

The aim of the study was to justify the possibility of using quantitative characteristics of the temperature regime of soils obtained by a joint analysis of ground-based and satellite monitoring to create cartographic models of typological units of soil-bioclimate zonation of the Khakassia and Tuva steppe basins.

Location and time of the study. The development of methodology for identifying the temperature fields boundaries was carried out in 2019-2022, using as a case example the soil cover typological units in the Altai-Sayan region, including the diversity of steppes of the Chulym-Yenisei and Minusinsk troughs, the Turan-Uyuk, Central Tuva, and Ubsu-Nur basins. Key areas were selected taking into account the principles of landscape zoning, which make it possible to recognize, classify and map landscape-differentiating factors, landscape components, the regional landscape structure in their entirety and its dynamic features.

Methods. Ground-based automated monitoring of air and soil was performed using specialized temperature recorders DS-1921G “Thermochron”, taking into account indicators reflecting the genetic unity of climate types in the Altai-Sayan region. To carry out retrospective analysis, statistical processing and visualization of MODIS data, a software and algorithmic toolkit created by the Institute of Computational Technology of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk) was used: the software is based on a new technology for accessing the satellite data archive, implemented using the PostgreSQL DBMS with an additional module, designed for direct access to the file data archive without the need to first copy and convert the data format for the DBMS.

Results. Based on a joint analysis of quantitative indicators of the air and soil temperature regimes, obtained using ground-based automated measuring systems and satellite data, a series of cartographic models were constructed: the latter reflect the temperature fields characteristics of typological units of soil-bioclimate zonation of the Altai-Sayan region. The interpretation of the identification of typological units of the soil cover structure performed on the basis of a statistical analysis of the combination of boundaries and information content of the contours of the soil cover and the boundaries of temperature fields (day and night temperatures, as well as the difference in temperatures of two compiled series, calculated over a 16-year period). The novelty of the approach is based on the fact that cartographic models of temperature fields, constructed on the basis of quantitative temperature indicators, have information content sufficient for establishing relationships between the temperature regime and other characteristics of natural environmental objects, contributing to solving the problem of identifying and typologizing soil-ecological boundaries.

Conclusions. Cartographic models of temperature fields obtained as a result of a joint analysis of ground-based and satellite data are sufficiently informative regarding the energy of soil-forming processes and can be used to assess soil thermal conditions in the inaccessible and hence poorly studied areas of the Altai-Sayan region.

Keywords: steppe basins; soil temperature fields; cartographic modeling; ground-based and satellite monitoring.

How to cite: Kudryashova S.Ya., Chumbaev A.S., Kurbatskaya S.S. Cartographic models of temperature fields of soils in the steppe basins of Khakassia and Tuva based on a joint analysis of temperature monitoring of ground-based and satellite data. *The Journal of Soils and Environment*. 2024. 7(1). e240 (in Russian with English abstract). DOI: [10.31251/pos.v7i1.240](https://doi.org/10.31251/pos.v7i1.240)

FUNDING

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

REFERENCES

- Korsunov V.M., Krasekha E.N., Raldin B.B. Methodology of soil-geographical research and soil cartography. Ulan-Ude: Publishing house BSC SB RAS, 2002. 232 p. (in Russian).
- Kudryashova S.Ya., Chumbaev A.S., Pestunov I.A., Bezborodova A.N., Kurbatskaya S.S., Rylov S.A., Sinyavsky Yu.N. Application of Remote Sensing Data and Ground Automated Monitoring of the Temperature Field of Soils for Cartographic Modeling of Soil Cover. In book: New methods and results of landscape research in Europe, Central Asia and Siberia. Vol. III. Moscow: D.N. Pryanishnikov Institute of Agrochemistry, 2018. P. 238–242. DOI: <https://doi.org/10.25680/1463.2018.67.60.243>. (in Russian).

Mamash E.A., Pestunov I.A., Ermakov N.B., Kudryashova S.Ya., Chumbaev A.S. Analysis of the long-term dynamics of the temperature regime of the chuya intermountain basin (republic of Altai) based on landsat data. Processing of spatial data in problems of monitoring natural and anthropogenic processes (SDM-2023) [Electronic resource]. Collection of proceedings of the All-Russian conference with international participation (Berdsk, 22–25 August, 2023). Novosibirsk: FIC IVT, 2023. P. 294–304. DOI: <https://doi.org/10.25743/sdm.2023.57.96.050>. (in Russian).

Sinyavskiy Yu.N., Pestunov I.A., Dubrovskaya O.A., Rylov S.A., Melnikov P.V., Ermakov N.B., Polyakova M.A. Methods and technology for segmenting high-resolution multispectral images for the study of natural and anthropogenic objects. *Computational Technologies*. 2016. Vol. 21. No. 1. P. 127–140. (in Russian).

Sinyavsky Yu.N., Rylov S.A. Experimental comparison of nonparametric clustering algorithms for segmentation of multispectral images. *Interexpo Geo-Siberia*. 2018. Vol. 1. No. 4. P. 109–114. (in Russian).

Arrouays D., McBratney A., Bouma J., Libohova Z., Richer-de-Forges A., Morgan L., Roudier P., Poggio L., Mulder V. Impressions of digital soil maps: The good, the not so good, and making them ever better. *Geoderma Regional*. 2020. Vol. 20. P. 1–7. E00255. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00255>.

Bouma J. Using soil survey data for quantitative land evaluation. *Advances in Soil Science: part of the book series / B.A. Stewart (eds)*. New York: Springer, 1989. Vol. 9. P. 177–213. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4612-3532-3_4.

Galve J., Sanchez J., Garcia-Santos V., Gonzalez-Piqueras J., Calera A., Villodre J. Assessment of Land Surface Temperature Estimates from Landsat 8-TIRS in A High-Contrast Semiarid Agroecosystem. Algorithms Intercomparison. *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14. No. 8. P. 843. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs14081843>.

McBratney A.B., Minasny B., Cattle S., Vervoort R. From Pedotransfer functions to soil inference systems. *Geoderma*. 2002. Vol. 109. Iss. 1–2. P. 41–73. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(02\)00139-8](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(02)00139-8).

Minasny B., McBratney A.B. Digital Soil mapping: A brief history and some lessons. *Geoderma*. 2016. Vol. 264. P. 301–311. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.07.017>.

Pachepsky Ya.A., Rawls W.J. Accuracy and reliability of pedotransfer functions as affected by grouping soils. *Soil Science Society of America Journal*. 1999. Vol. 63. Iss. 6. P. 1748–1757. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj1999.6361748x>.

Paradian J., Morris J., Minasny B., McBratney A.B. Pedotransfer Function and Soil Inference System. *Pedometrics*. 2018. P. 195–220. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-63439-5_7.

Sekertekin A., Bonafoni S. Land Surface Temperature Retrieval from Landsat 5, 7, and 8 over Rural Areas: Assessment of Different Retrieval Algorithms and Emissivity Models and Toolbox Implementation. *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12. No. 2. P. 294. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12020294>.

Shein E.V., Arkhangel'skaya T.A. Pedotransfer functions: State of the art, problems, and outlooks. *Eurasian Soil Science*. 2006. Vol. 10. No. 10. P. 1089–1099. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229306100073>.

Received 13 December 2023

Accepted 17 April 2023

Published 28 April 2024

About the authors:

Svetlana Ya. Kudryashova – 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); kudryashova@issa-siberia.ru

Alexander S. Chumbaev – Candidate of Biological Sciences, Head of the Laboratory 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); chumbaev@issa-siberia.ru

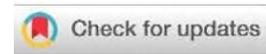
Svetlana S. Kurbatskaya – Doctor of Geographical Sciences, Head of the Laboratory of Geobotany and Soil Ecology, Tuvini Institute for Exploration of Natural Resources of Siberian Branch of RAS, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Kyzyl, Russia); lane.kurbatskaya@mail.ru

The authors read and approved the final manuscript



The article is available under Creative Commons Attribution 4.0 License

УДК 631.4

<https://doi.org/10.31251/pos.v7i1.243>

Особенности аккумуляции селена в ландшафтах города Тюмени (на примере Калининского административного округа)

© 2024 Н. Е. Гурьев , А. В. Синдирева , Н. Ф. Чистякова , Н. С. ТкаченкоФГАОУ ВО «Тюменский государственный университет», ул. Володарского, 6, г. Тюмень, 630090, Россия. E-mail: sindireva72@mail.ru

Цель исследования. Оценить особенности аккумуляции селена в ландшафтах г. Тюмени (на примере Калининского административного округа).

Место и время проведения. В статье обобщены результаты определения содержания селена в аллювиальных отложениях 2-ой надпойменной террасы реки Туры в окрестностях микрорайона Метелева, а также вертикальной и латеральной миграции этого элемента по склону оврага реки Бабарынки в г. Тюмени. Полевые и лабораторные исследования выполнены в летний период 2022 г.

Методы. В работе применены методы геологических, почвенных и лабораторных исследований.

Основные результаты. Содержание селена в разрезе аллювиальных отложений 2-й надпойменной террасы реки Туры в районе микрорайона Метелева г. Тюмени и в разрезе почвенного профиля склона реки Бабарынки изменяется с глубиной неоднозначно – от 0,015 до 0,053 мг/кг и от 0,01 до 0,09 мг/кг, находясь ниже значений ПДК по А. Кюке (10 мг/кг) и кларка, предложенного Н.А. Григорьевым (0,15 мг/кг). Не установлена зависимость содержания селена в лугово-чернозёмных и лессово-суглинистых почвах города Тюмени с содержанием органического вещества в этих почвах.

Заключение. На содержание и распределение селена в аллювиальных четвертичных отложениях 2-ой надпойменной террасы реки Туры оказывает влияние множество факторов, среди которых можно выделить минералогический и гранулометрический состав, а также условия формирования этих отложений. На латеральную миграцию селена в компонентах ландшафтов оказывает влияние интенсивность протекающих в них геоморфологических процессов, обуславливающих аккумуляцию и рассеивание элемента.

Ключевые слова: селен; аллювиальные отложения; рельеф; р. Тура; р. Бабарынка; г. Тюмень.

Цитирование: Гурьев Н.Е., Синдирева А.В., Чистякова Н.Ф., Ткаченко Н.С. Особенности аккумуляции селена в ландшафтах Калининского административного округа города Тюмени // Почвы и окружающая среда. 2023. Том 7. № 1. e243. DOI: [10.31251/pos.v7i1.243](https://doi.org/10.31251/pos.v7i1.243)

ВВЕДЕНИЕ

Селен – рассеянный микроэлемент, его содержание в земной коре невелико. По данным Н.А. Григорьева (2009), среднее содержание селена в верхней части земной коры составляет $1,5 \times 10^{-5}$ %. Основными источниками поступления селена в организм животных и человека являются корма и продукты питания, которые аккумулируют селен в результате его миграции из природных вод, почв и почвообразующих пород (Назаренко, Ермаков, 1971; Майманова, 2003; Барабанщикова, 2013; Шеуджен и др., 2013; Бусыгин, 2020).

Селен является одним из важнейших микроэлементов, оказывающих прямое воздействие на функционирование живого организма, выступая в роли антиоксиданта. В живом организме селен регулирует функции щитовидной и поджелудочной желез, положительно влияет на систему репродукции, оказывает влияние на рост и развитие организма. Недостаточное или избыточное содержание селена в живом организме способно вызывать ряд специфических заболеваний у человека (болезнь Кешана и др.). При высоком содержании селена в пастбищных растениях (более 1 мг/кг) у животных наблюдаются признаки хронического токсикоза (Назаренко, Ермаков, 1971; Майманова, 2003; Барабанщикова, 2013; Шеуджен и др., 2013; Бусыгин, 2020). Поэтому изучение причин низкого или избыточного содержания селена в почвах и почвообразующих породах, а также выявление факторов, оказывающих влияние на его содержание и особенности миграции в биогеохимической пищевой цепи, является актуальным.

Известно около 80 минералов селена, которые относятся к аналогам сульфидов – селенидам: ашавалит (FeSe), клаусталит (PbSe), тиманнит (HgSe), хастит (CoSe₂), науманнит (Ag₂Se), берцелианит (Cu₂Se), клокамманит (CuSe) и др.; селеносульфидам (агвиларит (Ag₄SeS)); селенатам (керстеинит (PbSeO₄·2H₂O)); селенитам (халькоменит (CuSeO₃·2H₂O), альфельдит (NiSeO₃·2H₂O)) и др. (Перельман, Касимов, 1999; Кривовичев и др., 2020).

Сопутствующими факторами, усиливающими аккумуляцию и миграцию селена в компонентах ландшафта, являются особенности геоморфологических условий и интенсивность экзогенных процессов, которые не всегда учитываются многими авторами. В этой связи оценку селенового статуса и разработку рекомендации на фоне низкого или избыточного содержания данного микроэлемента необходимо проводить, используя комплексный подход для решения данной проблемы (Барабанщикова, 2013; Шеуджен и др., 2013).

Цель исследования – оценить особенности аккумуляции селена в ландшафтах города Тюмени (на примере Калининского административного округа).

Задачи:

- изучить содержание и распределение селена в аллювиальных отложениях второй надпойменной террасы р. Туры в окрестностях микрорайона Метелева г. Тюмени;
- проанализировать современные геоморфологические особенности территории и их влияние на содержание и распределение селена в почвах оврага р. Бабарынки г. Тюмени.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

С административной точки зрения объекты исследования расположены в Калининском административном округе (АО) города Тюмени. По данным А.Н. Гусейнова (2001), в основе геологического строения территории г. Тюмени и его окрестностей лежат аллювиальные, озёрно-аллювиальные, аллювиально-делювиальные, субаэральные и озёрно-болотные четвертичные отложения. Участок работ представлен аллювиальными отложениями среднего плейстоценового возраста (aQ^3_{11}). Геологическое строение территории плотной городской застройки представлено преимущественно современными техногенными отложениями (Гвоздецкий, 1973; Иваненко, 1988; Бакулин, Козин, 1996; Гусейнов, 2001; Старков, Тюлькова, 2010).

Гидрографическая сеть г. Тюмени представлена рекой Турой и её малыми притоками: реками Конюшенка, Тюменка, Бабарынка, Ключи (Войновка), Казаровка, Ольховка, а также водоёмами различного генезиса, преимущественно природного и антропогенного происхождения. Зонально район исследования, согласно схеме почвенно-географического районирования юга Тюменской области, относится к лесостепной зоне, северо-лесостепной подзоне серых лесных почв и чернозёмов и располагается в Тура-Пышминском почвенном районе чернозёмов выщелоченных, серых лесных почв и боровых песков. Почвы изучаемых территорий представлены чернозёмами выщелоченными и лугово-чернозёмными (Гвоздецкий, 1973; Иваненко, 1988; Бакулин, Козин, 1996; Гусейнов, 2001; Старков, Тюлькова, 2010).

Изучение геолого-геоморфологических факторов, оказывающих влияние на распределение селена в ландшафте, проходило в два этапа. На первом этапе исследовали содержание и распределение селена в аллювиальных отложениях второй надпойменной террасы р. Туры методом ступенчатой зачистки склона отработанного карьера в окрестностях микрорайона Метелева г. Тюмени (табл. 1). Глубина ступеней составила 1,5 м, ширина – 1,7 м. Общая глубина разреза составила 10 м, где было выделено 15 горизонтов и отобрано 13 проб. Пробы почв, аллювиальных, пойменных и озёрно-аллювиальных отложений отбирали объединённым методом, общей массой 500 грамм. Интервал отбора составил (см): 0–180, 260–390, 390–480, 480–560, 560–570, 570–630, 630–670, 670–688, 688–740, 740–776, 776–826, 826–930 и 930–1040 (Старков, 1994).

На втором этапе работ изучили современные геоморфологические особенности склонов оврага р. Бабарынки в окрестностях ул. Прибрежная г. Тюмени. Были выделены участки на активной стадии развития эрозионных процессов. На разных участках склона (от бровки до дна) оврага р. Бабарынки ориентировочной длиной 60 м было сделано 4 почвенных разреза (см. табл. 1). Отбор проб почвы для изучения латеральной миграции селена в почвах склона в овраге р. Бабарынки проводили послойно с интервалом в 10 см (Хорошавин, 2011).

Лабораторные исследования отобранных проб проводили в аккредитованной испытательной лаборатории ФГБУ «ЦЛАТИ по УФО» по Тюменской области на атомно-абсорбционном спектрофотометре ЭТА Agilent AA – 240 z с электротермической атомизацией и коррекцией фона на основе эффекта Зеемана с модуляцией магнитного поля.

Статистическую обработку полученных результатов выполнили с использованием компьютерного пакета программ Microsoft Office Excel.

Таблица 1

Географические координаты и формула горизонтов надпойменной террасы р. Туры и почв оврага р. Бабарынки

Номер разреза	Географические координаты		Формула описываемых горизонтов
	северной широты	восточной долготы	
Песчаный карьер в окрестностях микрорайона Метелева			
1	N57°12'46"	E65°25'54"	A ₀ +A ₁ +AB+B+C _k (pd) + L+ pl+ L+ pl + L
Овраг р. Бабарынки			
1	57°10'30"	65°28'18"	A ₀ +A ₁ +AB+B
2	57°10'31"	65°28'19"	
3	57°10'32"	65°28'20"	
4	57°10'32"	65°28'20"	

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Участок работ представлен комплексом аллювиальных отложений среднего плейстоценового возраста (alQ³₁₁) (Старков, Тюлькова, 2010). Для территории исследования характерно периодическое изменение ландшафтных условий, которые отражаются в формировании и залегании имеющихся отложений. В стратиграфическом разрезе второй надпойменной террасы р. Туры в окрестностях микрорайона Метелева г. Тюмени были выделены следующие типы отложений: в верхней части разреза расположен чернозём выщелоченный, нижележащие горизонты представлены лессовидными суглинками, пойменными и русловыми аллювиальными отложениями с периодическими маломощными горизонтами погребённого торфяника (Астахов, 2020). В таблице 2 представлены сводные результаты по содержанию селена в стратиграфическом разрезе второй надпойменной террасы р. Туры в окрестностях микрорайона Метелева г. Тюмени.

Таблица 2

Содержание селена в стратиграфическом разрезе второй надпойменной террасы р. Туры

Описание	Генет. тип*	Мощность горизонта, см	Se, мг/кг	pH _{водн.}	Органическое вещество, %
Чернозём выщелоченный. Формула почвенного профиля: (A ₀ +A ₁ +AB+B+C _k)	pd	0–180	0,023±0,001	7,6	7,74
Лессовидно-суглинистые отложения с многочисленными слоями ожелезнения мощностью до 15 см и конкрециями карбонатов мощностью до 3 см	L	180–260	0,036±0,003	8,2	7,40
		260–390	0,035±0,002	8,4	6,67
		390–480	0,015±0,001	8,4	3,86
Залегающий горизонт речных аллювиальных отложений. Представлен преимущественно мелкозернистым кварцевым песком					
Погребённый горизонт низинного торфа с маломощными суглинистыми прослоями	pl	470–480	**	7,8	15
Слоистый аллювиальный горизонт, часто чередуется с суглинка на песок. Песчаные слои имеют ожелезнение. Обнаружено крупное включение образца серпентинита около 10 см	L	480–560	0,031±0,005	8,5	2,18
		560–570	0,033±0,002	7,9	15
Залегающий горизонт речных аллювиальных отложений. Стрежневая фация с мульдообразной песчаной слоистостью					
Залегающий горизонт, уплотнён, пластичен, имеет хорошо выраженные глинистые блоки, разделённые между собой тонкой песчаной линзой	pl	570–630	0,002±0,0005	8,3	2,93

Крупный залегающий монотонный горизонт, пластичен, суглинистого гранулометрического состава		630–670	0,002±0,001	7,8	1,83
Залегающие аллювиальные отложения с чередующимися фациями прирусловой отмели и прируслового вала. Горизонты представлены суглинками и хорошо отсортированным мелкозернистым песком	L	670–688	0,053±0,004	7,6	1,92
		688–740	0,043±0,003	7,6	1,00
		740–776	0,034±0,002	7,5	2,34
		776–826	0,022±0,001	8,1	3,22
		826–930	0,021±0,003	7,9	1,75
		930–1040	0,031±0,001	7,6	1,52

Примечание.

* – генетический тип по Шанцеру (1966). ** – ниже предела измерения оборудования.

Содержание селена в пробах варьировало в интервале от 0,002 (на глубине 570–630 см) до 0,053 мг/кг (на глубине 670–680 см). Полученные результаты не превышают ПДК по А. Клоке (1980) – 10 мг/кг, и находятся в диапазоне кларка, предложенного А.П. Виноградовым (0,01 мг/кг) и Н.А. Григорьевым (0,15 мг/кг) (Виноградов, 1957; Перельман, Касимов, 1999). По кислотности образцы почв характеризуются как нейтральные и слабощелочные.

Современные геоморфологические процессы и их интенсивность наряду с геологическим строением территории способны оказывать влияние на содержание и последующее распределение макро- и микроэлементов в ландшафте. Материалов по изучению влияния современных экзогенных процессов на содержание и распределение селена в ландшафте крайне мало. Часто эта информация крайне разрозненна, поэтому нельзя сделать однозначных выводов (Перельман, Касимов, 1999; Синдирева и др., 2021; 2023; Клок, 1980). Содержание и распределение селена в профиле лугово-чернозёмных почв неоднородно и меняется в зависимости от глубины, а также расположения разреза относительно склона оврага р. Бабарынки (рис. 1). Содержание селена в пробах изменялось в интервале от 0,011 до 0,095 мг/кг. Полученные результаты не превышают ПДК по А. Клоке (1980) и находятся в диапазоне кларка, предложенного А.П. Виноградовым (1957).

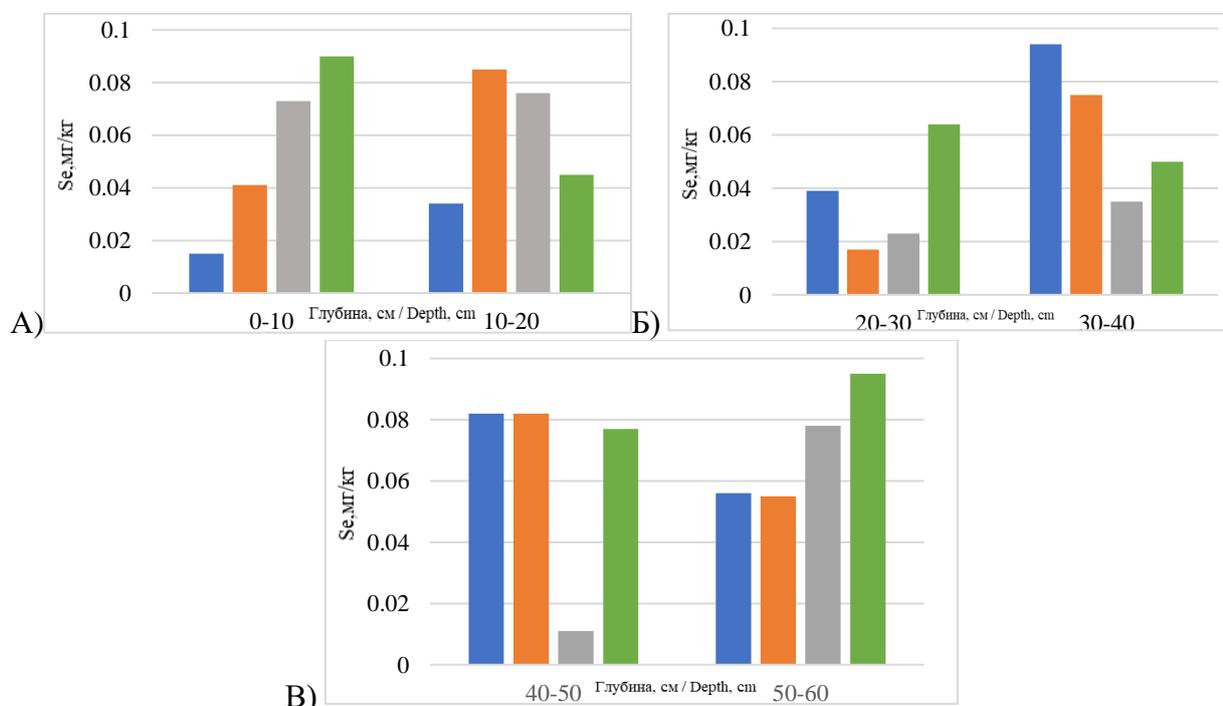


Рисунок 1. Вертикальное распределение селена в почвенных разрезах склона оврага р. Бабарынки.

Условные обозначения по содержанию селена на глубинах: А) 0–10 и 10–20 см; Б) 20–30 и 30–40 см; В) 40–50 и 50–60 см.

■ – Разрез № 1; ■ – Разрез № 2; ■ – Разрез № 3; ■ – Разрез № 4.

Тенденция к увеличению содержания селена в зависимости от глубины, а также расположения почвенного разреза на склоне, отчётливо прослеживается на глубине 0–10 см во всех почвенных разрезах. Содержание селена на рассматриваемой глубине увеличивается с 0,015 мг/кг у бровки склона (разрез 1) до 0,090 мг/кг у дна склона (разрез 4).

В пробах почв разрезов 1 и 2, расположенных на бровке и тыловом шве склона, выявлена тенденция к увеличению содержания селена на глубине 10–20 см аналогично 0–10 см, которое изменяется в диапазоне от 0,034 до 0,085 мг/кг. В разрезах 3 и 4 наблюдается уменьшение содержания селена с 0,076 до 0,045 мг/кг. С глубины 20–30 см и 30–40 см выявлено уменьшение его содержание в 2 и 1,2 раза между разрезами 1 и 2 с последующим увеличением в нижележащих разрезах. На глубине 40–50 см содержание селена в разрезах 1 и 2 находится в одном диапазоне (0,082 мг/кг) с резким снижением до 0,011 мг/кг в разрезе 3 и не менее резким увеличением до 0,077 мг/кг в 4 разрезе, расположенном на дне оврага р. Бабарынки. На глубине 50–60 см наблюдается тенденция к увеличению содержания селена с глубиной в зависимости от расположения на склоне оврага р. Бабарынки аналогично глубине 0–10 см.

ОБСУЖДЕНИЕ

Информация о содержании и распределении селена в осадочных отложениях крайне разрозненная и недостаточная. По данным отечественных ученых (Лебедев, 1973; Перельман, Касимов, 1999), селен в осадочных отложениях может содержаться в широком диапазоне – от 0,03 до 0,6 мг/кг и более. В аллювиальных, пролювиальных, озёро-аллювиальных, вулканических, болотных отложениях содержание селена больше, чем в коллювиальных, деллювиальных, дерупсионных, десерпционных, деляпсионных, эоловых и гляциальных образованиях (Барабанщикова, 2013; Бусыгин, 2020; Шеуджен и др., 2013; Перельман, Касимов, 1999). В связи с этим, изучение содержания селена, а также факторов, оказывающих влияние на его недостаточное или избыточное количество, является важным направлением с научной и практической точки зрения.

Низкое содержание селена в рыхлых осадочных отложениях второй надпойменной террасы р. Туры в окрестностях микрорайона Метелева г. Тюмени сопоставимо с его низким содержанием в основных зональных и интразональных типах почв юга области – от 0,006 до 0,09 мг/кг (Перельман, Касимов, 1999; Синдирева и др., 2021).

Изучен характер взаимодействия селена с уровнем рН и органическим веществом в отобранных пробах отложений (табл. 3). Выявлена средняя отрицательная корреляционная связь с уровнем рН ($r=0,47$) и не выявлена с содержанием органического вещества ($r=0,1$). Как правило, в кислых условиях среды с преобладанием органического вещества в почвенном растворе присутствуют селениды и сульфиды селена. В связи с этим содержание селена в таких условиях находится на достаточно «высоком» уровне в отличие от нейтральной и слабощелочной среды с низким содержанием органического вещества, где преобладают селениты и селенаты, обладающие высокой растворимостью. Отсутствие взаимосвязи селена с органическим веществом, очевидно, связано с тем, что на аккумуляцию селена оказывают влияние множество других факторов: наличие карбонатов, оксидов железа, а также большое количество органических остатков (Виноградов, 1957; Ермаков, Ковальский, 1974; Шеуджен и др., 2013).

Таблица 3

Характер взаимодействия селена с уровнем рН и органическим веществом

Уравнение регрессии	Характер взаимодействия
$Se = -0,023 \text{ рН} + 0,2; r = 0,47$	Отсутствует
$Se = 0,0002 \text{ Сор} + 0,03; r = 0,1$	Отсутствует

Одной из причин низкого содержания селена в аллювиальных отложениях второй надпойменной террасы р. Туры и, как следствие, в почвах, является отсутствие минералов селена в составе изучаемых отложений. По результатам исследования, преимущественными минералами разреза второй надпойменной террасы р. Туры являются: кварц, биотит, полевой шпат, ильменит, магнетит, плагиоклаз, оксиды железа, а также детрит; в их состав селен входит в качестве химической примеси. Зоны аккумуляции и интенсивной миграции данного микроэлемента приурочены к конкретным горизонтам. В сплошных песчаных горизонтах селен активно мигрирует в нижележащие горизонты, аккумулируясь в суглинистых и глинистых горизонтах, которые являются для него естественным механическими барьерами.

Другими немаловажными факторами, оказывающими влияние на содержание и распределение селена в компонентах ландшафта, являются геоморфологические условия территории. Влияние современных экзогенных процессов на содержание и латеральную миграцию макро- и микроэлементов, в частности, селена, требует более детальных исследований в данном направлении с выделением зон интенсивного выноса и аккумуляции элемента на разных геоморфологических уровнях территории.

Причиной изменения содержания селена в верхнем почвенном слое является активное развитие эрозионных процессов на данном участке, в связи с чем происходит интенсивное разрушение и перенос верхней части горизонта A_1 по естественному уклону местности и его аккумуляция на дне оврага в период ливневых дождей, а также талых снеговых вод. Повторный латеральный перенос селена уже на глубине 50–60 см связан с изменением гранулометрического состава почв, а также с изменениями содержания почвенной влаги в исследованных местах. Стоит отметить, что участок работ местами осложнен единичными видами кустарничковой растительности, а также грунтовой дорогой между разрезами 2 и 3. В связи с этим установить четкую закономерность в латеральной миграции на глубинах 20–30 и 30–40 см достаточно сложно из-за созданного антропогенного барьера. Поэтому необходимы более детальные исследования в данном направлении.

ВЫВОДЫ

1. На содержание и распределение селена в четвертичных осадочных отложениях второй надпойменной террасы р. Туры в окрестностях микрорайона Метелева г. Тюмени оказывают влияние множество факторов, среди которых можно выделить минералогический и гранулометрический состав отложений, а также условия их формирования. Перечисленные выше факторы способствуют рассеиванию и аккумуляции селена в песчаных и суглинисто-глинистых горизонтах.

2. Низкое содержание селена в различных типах почв г. Тюмени является региональной особенностью минералогического состава материнских отложений исследованных почв.

3. Латеральная и вертикальная миграция селена в почвах г. Тюмени активизируется современными экзогенными геологическими процессами с преобладанием оврагообразования и эрозионных процессов, что приводит к изменению рельефа поверхности данной территории и активизации его перераспределения в почвенном профиле.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современные геоморфологические процессы наряду с геологическим строением и палеогеографическими условиями формирования отложений территории оказывают влияние на миграцию и аккумуляцию селена в ландшафте. На миграцию селена на разных участках ландшафта может также оказывать влияние интенсивность протекающих в нем геоморфологических процессов, от интенсивности и типа которых будет зависеть формирование зон аккумуляции и рассеивания данного микроэлемента. Таким образом, изучение геолого-геоморфологических и палеогеографических условий является важной и неотъемлемой составляющей при оценке селенового статуса территории, которые должны быть учтены наряду с остальными параметрами.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны кандидату геолого-минералогических наук, профессору кафедры физической географии и экологии ТюмГУ Старкову В.Д. за критические замечания и помощь в определении минералов в отобранных пробах.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-55-44028.

ЛИТЕРАТУРА

Астахов В.И. Четвертичная геология суши: учебное пособие. Санкт-Петербург: Издательство С.-Петерб. университета, 2020. 440 с.

Барабанщикова Л.Н. Содержание и распределение селена в агроландшафтах северного Зауралья. Диссертация ... канд. биол. наук. Тюмень, 2013. С. 9–29.

Бакулин В.В., Козин В.В. География Тюменской области. Екатеринбург: Средне-Уральское книжное издательство, 1996. 240 с.

- Бусыгин А.С. Эффективность применения селеновых удобрений под яровую пшеницу на почвах Северо-Восточного Нечерноземья. Диссертация ... канд. биол. наук. Москва, 2020. 140 с.
- Виноградов А.П. Геохимия редких и рассеянных элементов в почвах. Москва: Наука, 1957. 218 с.
- Гвоздецкий Н.А. Физико-географическое районирование Тюменской области. Москва: Издательство Московского университета, 1973. 245 с.
- Гусейнов А.Н. Экология города Тюмени: состояние, проблемы. Тюмень: Издательство «Слово», 2001. 176 с.
- Ермаков В.В., Ковальский В.В. Биологическое значение селена. Москва: Наука, 1974. 300 с.
- Иваненко А.С. Окрестности Тюмени. Свердловск: Среднеуральское книжное издательство, 1988. 207 с.
- Кривовичев В.Г., Чарыкова М.В., Кривовичев С.В. Минеральные системы, основанные на числе видообразующих химических элементов в минералах: их разнообразие, сложность, распространенность в природе и эволюция в геологической истории (обзор) // Записки Российского минералогического общества. 2020. Том 149. № 1. С. 1–22. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869605520010062>.
- Лебедев В.Н. Содержание селена в почвах БССР. Автореферат диссертации ... канд. с.-х. наук. Жодино, 1973. 20 с.
- Майманова Т.М. Селен в основных компонентах ландшафтов Горного Алтая. Автореферат диссертации ... канд. биол. наук. Новосибирск. 2003. 22 с.
- Назаренко И.И., Ермаков А.Н. Аналитическая химия селена и теллура. Москва: Наука, 1971. С. 7–18.
- Перельман А.И., Касимов Н.С. Геохимия ландшафта: учебник. Москва: Издательство МГУ, 1999. 610 с.
- Синдирева А.В., С.Г. Котченко, Гурьев Н.Е. Геохимическая оценка содержания селена в основных типах почв Тюменской области // Проблемы региональной экологии. 2021. № 3. С. 32–38. DOI: <https://doi.org/10.24412/1728-323X-2021-3-32-38>.
- Синдирева А.В., Чистякова Н.Ф., Гурьев Н.Е., Ткаченко Н.С. Влияние геолого-геоморфологических факторов на распределение селена в компонентах окружающей среды // Почвы и окружающая среда [Электронный ресурс]: Сборник научных трудов Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 55-летию Института почвоведения и агрохимии СО РАН (Новосибирск, 2–6 октября 2023 г.). Новосибирск: ИПА СО РАН, 2023. С. 663–668. DOI: <https://doi.org/10.31251/conf1-2023>.
- Старков В.Д. Учебная полевая практика по геоморфологии. Тюмень: ТГУ, 1994. 100 с.
- Старков В.Д., Тюлькова Л.А. Геология, рельеф, полезные ископаемые Тюменской области. Тюмень: Тюменский дом печати, 2010. 349 с.
- Хорошавин В.Ю. География почв. Почвоведение: Учебно-методическое пособие по учебной практике для учащихся II курса ОДО направлений подготовки бакалавров «География», «Экология и природопользование». Тюмень: ТГУ, 2011. 40 с.
- Шанцер Е. В. Очерки учения о генетических типах континентальных осадочных образований. Труды, вып. 161. Москва: Наука, 1966. 239 с.
- Шеуджен А.Х., Лебедевский И.А., Бондарева Т.Н. Биогеохимия и агрохимия селена // [Научный журнал Кубанского государственного аграрного университета \(Куб ГАУ\)](#). 2013. № 92(08). С. 1–11.
- Klok A. Richtwerte 80. Orientirugsdaten fur tolerierbare einiger Elemente in Kulturboden // *Mitteilungen des VDLUFA*. 1980. Bd. 2. H. 1–3. P. 9.

Поступила в редакцию 20.12.2023

Принята 21.03.2024

Опубликована 26.03.2024

Сведения об авторах:

Гурьев Никита Евгеньевич – ассистент кафедры геоэкологии и природопользования Школы естественных наук ФГАОУ ВО «Тюменский государственный университет» (г. Тюмень, Россия); nikitka.gurev.1996@mail.ru.

Синдирева Анна Владимировна – доктор биологических наук, доцент, заведующая кафедры геоэкологии и природопользования Школы естественных наук ФГАОУ ВО «Тюменский государственный университет» (г. Тюмень, Россия); a.v.sindireva@utmn.ru.

Чистякова Нелли Федоровна – доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры геоэкологии и природопользования Школы естественных наук ФГАОУ ВО «Тюменский государственный университет» (г. Тюмень, Россия); n.f.chistyakova@utmn.ru.

Ткаченко Никита Сергеевич – аспирант кафедры геоэкологии и природопользования Школы естественных наук ФГАОУ ВО «Тюменский государственный университет» (г. Тюмень, Россия); stud0000102421@study.utmn.ru

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.



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

Selenium accumulation in the landscapes of Tyumen city (the case of Kalininsky administrative district)

© 2024 N. E. Guriev , A. V. Sindireva , N. F. Chistyakova , N. S. Tkachenko

Tyumen State University, Institute of Earth Sciences, 6 Volodarskogo St., Tyumen, 630090, Russia. E-mail: sindireva72@mail.ru

The aim of the study was to investigate peculiarities of Selen accumulation in the Tyumen City landscapes (on the territory of Kalininsky Administrative District).

Location and time of the study. The study was conducted in the summer of 2022 on the 2nd supra floodplain terrace of the Tura River in the vicinity of the Meteleva microdistrict, as well as on the gully slope of the Babarynka River in Tyumen.

Methods. Methods of geological and soil studies, chemical and statistical methods were used to analyze selenium content in alluvial sediments and its vertical and lateral migration along a slope.

Main results. Selenium content was found to change irregularly with the depth both in the alluvial deposits of the 2nd above-floodplain terrace of the river in the area of the Metelev microdistrict and in the soil profile of the Babarynka River slope, varying from 0.015 to 0.053 mg/kg and from 0.01 to 0.09 mg/kg, respectively, and being below the MPC values (according to A. Kloke of 10 mg/kg) and the Clark value of 0.15 mg/kg, proposed by N.A. Grigoriev. Selenium content in meadow-chernozem and loess-loamy soils of Tyumen was not correlated with the soil organic matter content.

Conclusion. Selenium content and distribution in the alluvial Quaternary sediments of the 2nd supra floodplain terrace of the Tura River is influenced by many factors, the most important being sediment mineralogy and mechanical properties, as well as conditions of sediment formation in the past. The lateral migration of selenium in landscape components is influenced by the intensity of occurring geomorphologic processes, resulting in selenium accumulation and dispersion.

Key words: selenium; alluvial sediments; relief; Tura River; Babarynka River; Tyumen city.

How to cite: Guriev N.E., Sindireva A.V., Chistyakova N.F., Tkachenko N.S. Selenium accumulation in the landscapes of Tyumen City (the case of Kalininsky Administrative District). *The Journal of Soils and Environment*. 2024. 7(1). e243 (in Russian with English abstract). DOI: [10.31251/pos.v7i1.243](https://doi.org/10.31251/pos.v7i1.243).

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors are grateful to V.D. Starkov, Candidate of Geophysical Sciences, Professor of the Department of Physical Geography and Ecology, TyumSU, for critical comments and assistance in determining minerals in the selected samples.

FUNDING

The study was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project No. 20-55-44028).

REFERENCES

- Astakhov V.I. Quaternary land geology: textbook. St. Petersburg: St. Petersburg University Publishing House, 2020. 440 p. (in Russian).
- Barabamshchikova L.N. Selenium content and distribution in agrolandscapes of the northern Trans-Urals. Dissertation ... Cand. of Biol. Sci. Tyumen, 2013. P. 9–29. (in Russian).
- Bakulin V.V., Kozin V.V. Geography of the Tyumen Region. Ekaterinburg: Sredne-Uralskoe Book Publishing House, 1996. 240 p. (in Russian).

- Busygin A.S. Efficiency of application of selenium fertilizers for spring wheat on soils of the North-Eastern Non-Chernozem region. Dissertation ... Cand. of Biol. Sci. Moscow, 2020. 140 p. (in Russian).
- Vinogradov A.P. Geochemistry of rare and dispersed elements in soils Moscow: Nauka Publ., 1957. 218 p. (in Russian).
- Gvozdetsky N.A. Physico-geographical zoning of the Tyumen region. Moscow: Moscow University Publishing House, 1973. 245 p. (in Russian).
- Guseinov A.N. Ecology of Tyumen city: state, problems. Tyumen: "Slovo" Publishing House, 2001. 176 p. (in Russian).
- Ermakov V.V., Kovalsky V.V. Biological significance of selenium. Moscow: Nauka Publ., 1974. 300 p. (in Russian).
- Ivanenko A.S. Near Tyumen: textbook. Sverdlovsk: Sredneuralsk Book Publishing House, 1988. 207 p. (in Russian).
- Krivovichev V.G., Charykova M.V., Krivovichev S.V. Mineral systems based on the number of species-defining chemical elements in minerals: their diversity, complexity, distribution, and the mineral evolution of the earth's crust: a review. *Geology of Ore Deposits*. 2020. Vol. 62. No. 8. P. 704–718. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1075701520080073>.
- Lebedev V.N. Selenium content in soils of BSSR. Abstract of Dissertation ... Cand. of Agricultural Sci. Zhodino, 1973. 20 p. (in Russian).
- Maimanova T.M. Selenium in the main components of landscapes of the Altai Mountains. Abstract of Dissertation ... Cand. of Biol. Sci. Novosibirsk. 2003. 22 p. (in Russian).
- Nazarenko I.I., Ermakov A.N. Analytical chemistry of selenium and tellurium. Moscow: Nauka Publ., 1971. P. 7–18 (in Russian).
- Perelman A.I., Kasimov N.S. Geochemistry of landscape: textbook. Moscow: Moscow University Publishing House, 1999. 610 p (in Russian).
- Sindireva A.V., Kotchenko S.G., Guryev N.E. Geochemical assessment of selenium content in the main types of soils of the Tyumen region. *Regional environmental issues*. 2021. No. 3. P. 32–38. DOI: <https://doi.org/10.24412/1728-323X-2021-3-32-38>.
- Sindireva A.V., Chistyakova N.F., Tkachenko N.S. Influence of geologic and geomorphologic factors on selenium distribution in environmental components. In book: *Soils and Environment [Electronic resource]: Collection of scientific papers of the All-Russian scientific conference with international participation, dedicated to the 55th anniversary of the Institute of Soil Science and Agrochemistry SB RAS (Novosibirsk, October 2–6, 2023)*. Novosibirsk: ISSA SB RAS, 2023. P. 27–36. DOI: <https://doi.org/10.31251/conf1-2023>. (in Russian).
- Starkov V.D. Educational field practice in geomorphology. Tyumen: TSU, 1994. 100 p. (in Russian).
- Starkov V.D., Tyulkova L.A. Geology, relief, minerals of the Tyumen region. Tyumen: Tyumen Press House, 2010. 349 p. (in Russian).
- Khoroshavin V.Yu. Geography of soils. Soil science: Educational and methodical manual on educational practice for students of the II year of ODO directions of bachelor's training "Geography", "Ecology and nature management". Tyumen: TSU, 2011. 40 p. (in Russian).
- Shantzer E. V. Essays on the theory of genetic types of continental sedimentary formations. Proceedings, issue 161. Moscow: Nauka Publ., 1966. 239 p. (in Russian).
- Sheudzhen A.H., Lebedovsky I.A., Bondareva T.N. Biogeochemistry and selenium Agrochemistry. *Scientific Journal of Kuban State Agrarian University (KubSAU)*. 2013. No. 92 (08). P. 1–11. (in Russian).
- Klok A. Richtwerte 80. Orientierungsdaten für tolerierbare einiger Elemente in Kulturboden. *Mitteilungen des VDLUFA*. 1980. Bd. 2. H. 1–3. P. 9.

Received 20 December 2023

Accepted 21 March 2024

Published 26 March 2024

About the authors:

Guriev Nikita Evgenyevich – Assistant, the Department of Geocology and Nature Management of the Institute of Earth Sciences, the Federal State Educational Institution of Higher Professional Education "Tyumen State University" (Tyumen, Russia); nikitka.gurev.1996@mail.ru.

Sindireva Anna Vladimirovna – Doctor of Biological Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Geocology and Nature Management, Institute of Earth Sciences, Tyumen State University (Tyumen, Russia); a.v.sindireva@utmn.ru.

Chistyakova Nelly Fedorovna – Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor of the Department of Geoecology and Nature Management, Institute of Earth Sciences, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Tyumen State University" (Tyumen, Russia); n.f.chistyakova@utmn.ru.

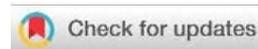
Tkachenko Nikita Sergeevich – Postgraduate Student of the Department of Geoecology and Nature Management of the Institute of Earth Sciences, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Tyumen State University" (Tyumen, Russia); stud0000102421@study.utmn.ru.

The authors read and approved the final manuscript



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

УДК 631.4

<https://doi.org/10.31251/pos.v7i1.257>

Прошлое, настоящее и будущее аграрной науки в Омском Прииртышье

© 2024 М. С. Чекусов , В. С. Бойко 

ФГБНУ «Омский аграрный научный центр», проспект Королёва, 26, г. Омск, 630090, Россия. E-mail:

mchekusov@anc55.ru, boicko.vasily2011@yandex.ru

В статье рассмотрен исторический путь сибирской аграрной науки на примере Омского региона. Двухвековой юбилей Омской области исторически близок по времени развитию региональной аграрной науки. Отмечены этапы её развития: создание опытного хутора в XIX веке, Сибирского НИИ зернового хозяйства в 1933 г., Сибирского НИИ сельского хозяйства в 1956 г. и реализация в 2018 г. интеграционного проекта по созданию ФГБНУ «Омский аграрный научный центр», объединившего региональные научные организации сельскохозяйственного профиля.

Ключевые слова: сельскохозяйственная наука; история организации; сельское хозяйство Сибири; животноводство; ветеринария.

Цитирование: Чекусов М.С., Бойко В.С. Прошлое, настоящее и будущее аграрной науки в Омском Прииртышье // Почвы и окружающая среда. 2024. Том 7. № 1. e257. DOI: [10.31251/pos.v7i1.257](https://doi.org/10.31251/pos.v7i1.257).

Аграрная наука в Сибири берет своё начало в Омском Прииртышье. Исторически сложилось так, что академическая наука здесь всегда в наибольшей степени была представлена аграрным направлением. В далёком 1828 году генерал-губернатором Западной Сибири **Иваном Александровичем Вельяминовым** (почётным членом Московского общества сельского хозяйства) был издан Указ об организации опытного хутора в Омске (рис. 1, 2). Это было первое научное учреждение в Сибири и второе в России. В это же время, после успешного окончания земледельческой школы Московского общества сельского хозяйства (МОСХ), в Омск возвращаются два агронома: **Пётр Щербаков** и **Осип Обухов**, направленные ранее в эту школу общественностью. Оба приняли активное участие в становлении опытнического дела на казачьем опытном хуторе (Вараксин, Катин-Ярцев, 1986).



Рисунок 1. Иван Александрович Вельяминов.

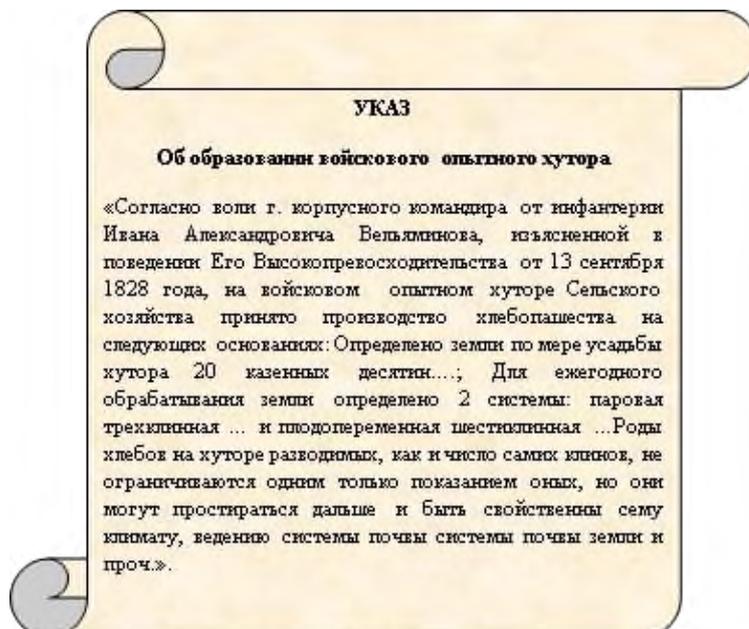


Рисунок 2. Указ об образовании войскового опытного хутора в Омске.

Перед опытным хутором ставилась цель – разведение наиболее полезных и свойственных сибирскому краю растений, распространение сведений между поселениями. В 1831 году хутор имел в своём хозяйстве дом для конторы и смотрителя, надворные постройки, сад, парники, более 50 овец.

Высевались несколько сортов пшеницы, ячмень, табак, изучались овощные культуры. С 1832 году на хуторе приступили к коннозаводству и разведению тонкорунных овец; племенные овцы поставлялись на овчарни всей Сибири (Аграрная наука..., 2004).

Омский казачий опытный хутор оказал большое влияние на развитие сельскохозяйственной культуры в Сибири и на Дальнем Востоке. По его примеру в различных местах от Урала до Камчатки стали создаваться опытные хозяйства и земледельческие компании.

Первые итоги опытных работ, проведённых на Омском хуторе, были опубликованы в «Земледельческом журнале» Императорского МОСХ в 1830–1838 гг. (рис. 3). Были представлены результаты испытаний различных сельскохозяйственных культур, в том числе Китайской и Калмыцкой пшеницы, изучена их агротехника. В отчёте указано, что сеют эти пшеницы с 25 апреля по 10 мая. Сеют на десятину 6–8 пудов, урожайность составляет 90–120 пудов. Были испытаны новые машины и орудия, полученные из МОСХ. Представлены результаты разведения тонкорунных овец (Вараксин, Катин-Ярцев, 1986).

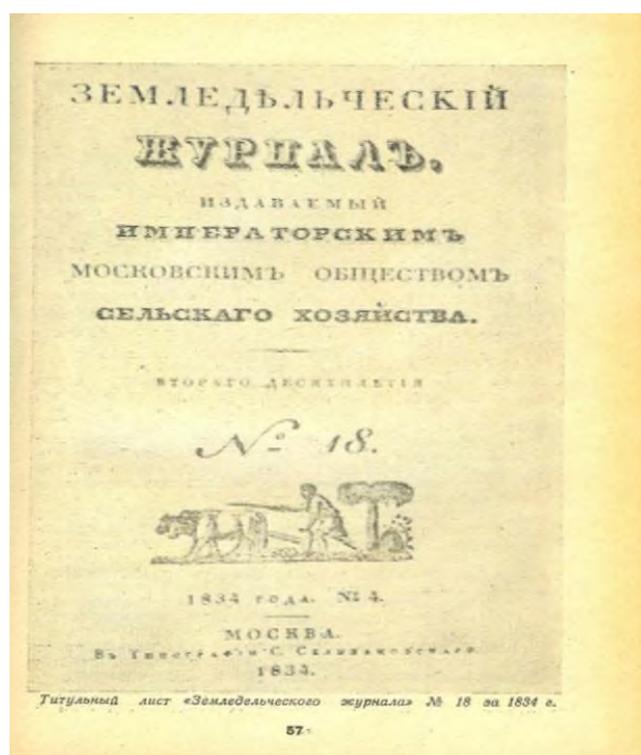


Рисунок 3. Земледельческий журнал 1834 года.

В 1853 году создаётся Омское опытное поле местного управления Министерства государственных имуществ, при котором организуются образцовая животноводческая ферма и сельскохозяйственная школа. В 1887 году на опытном поле проводятся «пробные посевы» и испытание сельскохозяйственных машин. К 1890 году здесь приступили к сортоизучению и разработке агротехнических приёмов. В 1894 году образуется комплексное опытное поле с сетью лесных питомников, плодоводством и всеми функциями опытного учреждения. В 1910 году выделилась машинно-испытательная станция, успешно работавшая под руководством агронома **В.П. Балиева** по испытанию работы различных орудий по обработке почвы. В 1912 году Омская сельскохозяйственная школа преобразуется в среднее сельскохозяйственное училище (Вараксин, Катин-Ярцев, 1986).

В 1918 году по рекомендации Института опытной агрономии и прикладной ботаники в Омск приезжает профессор **Виктор Викторович Таланов**. Он сразу же поставил вопрос о необходимости создания специальной селекционной станции в сибирских условиях. Агрономическое совещание, проведённое в 1918 году губернским советом народного хозяйства, по докладу В.В. Таланова приняло соответствующее постановление; в том же году станция была организован, начаты отвод опытных участков и постройка зданий. Вскоре селекционные работы были перенесены на новые земли, приобретя постоянный характер. Исполнителями первых полевых опытов стали **Ю.Н. Скалозубов** и **В.В. Таланова** (дочь В.В. Таланова), а затем и молодые специалисты из

сельскохозяйственного училища. Профессор В.В. Таланов проработал в Омске около 5 лет (Храмцов, Кошелев, 2015).

По настоянию омских общественных организаций, Временное правительство Керенского постановило, несмотря на хозяйственную разруху, открыть в Омске с 1 января 1918 года Сибирский сельскохозяйственный институт. С ним связаны имена крупных учёных: **П.Л. Драверт** – минеролог, **С.С. Неуструев** – почвовед-географ, **К.П. Горшенин** – почвовед, **А.З. Ламбин** – агрохимик и другие (Хлеб Прииртышья, 1999). В Омске в то время существовали отдельно и опытное поле, и областная опытная станция, и областная машиноиспытательная станция. В 1924 г. эти сельскохозяйственные учреждения объединяются в одну комплексную областную сельскохозяйственную опытную станцию (рис. 4) с шестью отделами: земледелия (руководитель **А.В. Федоровский**), селекции (**В.Р. Берг**), животноводства (**А.И. Мирославов**), машиноиспытательным (**С.В. Башкиров**), экономическим (**И.Н. Скорняков**) и фитопатологическим (**В.С. Данченко**). В 1927 г. дополнительно организуется отдел крестьян-опытников под руководством **А.В. Ребрина** (Достижения сибирских..., 1929).



Коллектив работников Западно-Сибирской областной СХОС. 1931г.

Рисунок 4. Сотрудники Западно-Сибирской областной сельскохозяйственной опытной станции.

Высокий научный кругозор первопроходцев сибирской селекции обеспечил уже в 1930–1940 гг. создание ряда сортов сельскохозяйственных культур, которые стали крупными достижениями отечественной науки. Именно в эти годы были созданы уникальные сорта яровой пшеницы: Мильтурум 321, Цезиум 111, Альбидум 3700, ячменя – Омский 13709, которые отслужили добрую службу не только сибирскому земледелию, но и в тяжёлые военные и послевоенные годы кормили, спасая от голода, население большинства областей европейской части страны.

В 1931 году в г. Омск создаётся зональная зерновая опытная станция Зернотреста. Предвоенные годы тесно связаны с именем академика АН СССР, ВАСХНИЛ, дважды Героя Социалистического труда, лауреата Ленинской премии **Николая Васильевича Цицина**, в 1931–1937 гг. заведующего организованной им лабораторией пшенично-пырейных гибридов (Яхтенфельд, 1954).

В 1933 году СНК СССР принимает постановление об организации в Омске Сибирского научно-исследовательского института зернового хозяйства (СибНИИЗХ, рис. 5) на основе ранее действовавшей сельскохозяйственной опытной станции, первым директором которого был назначен **С.Г. Алексеев**. Этот период является знаковым для развития в Сибири аграрной науки; сам факт создания института стал мощным дополнительным импульсом.

В это время в Омске уже работали крупные специалисты по земледелию и селекции, животноводству и механизации; для работы в институте привлекались лучшие научные силы из других регионов страны. Значительно расширилась география деятельности института, поскольку СибНИИЗХ в этот период был единственным в Сибири научным учреждением сельскохозяйственного профиля.

В состав СибНИИЗХ входило четыре отдела (земледелие, селекция, организация и экономика, защита растений) с десятью лабораториями. В институт были включены три зональные станции с их

опорными пунктами: Карабалыкская, Канашинская, Томская. Кроме того, институт должен был осуществлять непосредственное руководство еще шестью опорными пунктами, с самого начала являясь крупным сельскохозяйственным научно-исследовательским и научно-методическим центром на востоке страны.

Николай Васильевич Орловский – учёный-почвовед, доктор сельскохозяйственных наук, профессор – после окончания факультета агрохимии и почвоведения Московской сельскохозяйственной академии им. К.А. Тимирязева работал в НИУ Поволжья и Сибири; в 30-е годы XX столетия он создал в СибНИИЗХ лабораторию агрохимии. В эти же годы в институте плодотворно работала **Надежда Львовна Удольская**. После окончания Иркутского университета она поступила на работу в Омскую опытную станцию в должности сезонного практиканта. На этой станции, впоследствии реорганизованной в СибНИИЗХ, Н.Л. Удольская работала до 1937 года; её считают одним из основателей частной (сортовой) физиологии растений.



Рисунок 5. Здание Сибирского научно-исследовательского института зернового хозяйства в г. Омск (СибНИИЗХ).

С 25 июля по 1 августа 1936 года в СибНИИЗХ прошла выездная сессия ВАСХНИЛ, которую открыл **Николай Иванович Вавилов**, сделав доклад о работах Всесоюзного института растениеводства.

В 1940 году СибНИИЗХ за высокие достижения в научной деятельности был награждён орденом Трудового Красного Знамени. В военный период большинство научных сотрудников СибНИИЗХ ушли защищать Родину. В начале войны в Омск была эвакуирована Всесоюзная академия сельскохозяйственных наук им. Ленина (ВАСХНИЛ). Таким образом, научным центром по руководству сельским хозяйством в стране в военные годы стал г. Омск (Научный отчет..., 1946). Несмотря на тяжёлое время, научная работа в СибНИИЗХ проводилась по всем направлениям. Например, был создан сорт ячменя «Омский 13709», который к 1947 году занимал в стране площадь более 4 млн га (Аграрная наука..., 2004).

В послевоенные годы в институте начал работать **А.Е. Кочергин**, вернувшийся с фронта. Большая часть жизни и практически вся его научная деятельность (более 40 лет) связана с Сибирским НИИ сельского хозяйства. Профессор А.Е. Кочергин, академик Г.П. Гамзиков и их ученики сформировали школу агрохимиков Сибири, которой разработаны теоретические основы минерального питания зерновых культур, шкалы обеспеченности растений элементами питания, методика диагностики почвенного питания и приёмы повышения эффективности удобрений.

В 1950 году звание лауреата Государственной премии СССР было присвоено кандидату сельскохозяйственных наук **И.Н. Смирнову** и **И.Н. Семченкову** за большие достижения в области селекции. С 1953 года в СибНИИЗХ возобновляется работа с кукурузой, руководителем которой становится доктор сельскохозяйственных наук **Б.И. Герасенков**, также участник ВОВ (Сибирский научно-исследовательский..., 2023).

С 1956 года по Постановлению ЦК КПСС и Совета Министров СССР Институт зернового хозяйства преобразуется в крупное комплексное учреждение – Сибирский научно-исследовательский институт сельского хозяйства (СибНИИСХоз). К нему присоединяют Омскую областную станцию животноводства и Омскую областную плодово-ягодную станцию. В СибНИИСХозе начинают

работать новые научные отделы и лаборатории, укрупняется опытное хозяйство. В течение многих лет институт осуществлял научно-методическое руководство всеми сельскохозяйственными опытными станциями Сибири (Сибирская сельскохозяйственная наука..., 1968).

В 1964 году на базе отдела механизации института организовано первое в аграрных учреждениях Сибири хозрасчетное предприятие – опытно-конструкторское бюро (ОКБ СибНИИСХ). В настоящее время это Омский экспериментальный завод, который разрабатывает и производит современную сельскохозяйственную технику и оборудование, в том числе для научных исследований.

Благодаря организации в 1970 году селекционного центра (рис. 6), более плодотворно стала проводиться работа по созданию новых сортов зерновых, зернобобовых, кормовых культур и картофеля. Всего за период с 1926 по 2020 годы создано и включено в государственный реестр селекционных достижений России более 200 новых сортов сельскохозяйственных культур.



Рисунок 6. Здание селекционного центра.

8 апреля 1982 года Совет Министров СССР своим Постановлением присудил коллективу ученых СибНИИСХ премию Совета Министров за разработку мероприятий по увеличению производства и продажи высококачественного зерна пшеницы в Омской области. В 1986 году звание лауреата Государственной премии СССР было присвоено доктору сельскохозяйственных наук **В.С. Ильину** за разработку методов селекции и создание раннеспелых гибридов кукурузы (Хлеб Прииртышья, 1999; Селекционно-семеноводческий центр..., 2020).

Миграция населения в конце XIX – начале XX веков из центральной части России в Сибирь, массовое переселение крестьянских семей с личным подворьем способствовали росту численности поголовья домашних животных, широкому развитию отрасли животноводства.

Вместе с ввозом животных из других регионов на территорию Омской области были занесены возбудители опасных заразных заболеваний, которые ранее здесь не регистрировались. В связи с этим, постоянно возникали вспышки эпизоотий и падеж скота, наносящие огромный экономический ущерб крестьянским хозяйствам и региону в целом. Сложившаяся ситуация требовала эффективных мер борьбы с инфекциями, создания научных разработок с целью эффективного ветеринарного обслуживания сибирского животноводства.

В 1910 году была создана Западно-Сибирская ветеринарная лаборатория, на базе которой в 1921 году открыли первый за Уралом научно-исследовательский институт ветеринарного профиля. За 100 лет своей деятельности институт прошёл несколько структурных преобразований, которые находились в тесной связи с общественно-политическими и социально-экономическими условиями Омской области и всей страны. С первых дней создания института, коллектив ученых и специалистов занимался диагностическими исследованиями материалов, присылаемых участковыми ветеринарными врачами, частными лицами, а также готовил биологические препараты для лечения животных и прививочный материал от инфекционных болезней. Благодаря разработкам ученых института удалось оздоровить хозяйства Омской области и других сибирских регионов от опасных инфекций.

Принятие постановления ЦК КПСС и Совета Министров СССР от 3 сентября 1964 года № 740 «Об организации производства яиц и мяса птицы на промышленной основе» было прорывом к широкому развитию промышленных форм производства продукции птицеводства. Сразу встала необходимость научно обоснованного подхода к разведению высокопродуктивной птицы, разработке полнорационных сухих комбикормов, режимов содержания, инкубации и ветеринарной защиты. Всё это требовало создания сети научных баз в регионах. Такой сетью стало создание семи зональных опытных станций по птицеводству: Северо-Кавказская, Западно-Сибирская, Дальневосточная, Белорусская, Прибалтийская и Закавказская.

Согласно приказу по Птицепрому СССР от 12 октября 1967 года № 37 и приказу по Омскому тресту «Птицепром» от 18 октября 1967 года № 190 на базе отделения «Морозовка» Омской птицефабрики Омского треста «Птицепром» была создана Западно-Сибирская зональная опытная станция (ЗОСП). Руководителем станции назначили кандидата сельскохозяйственных наук **Владимира Ивановича Фисинина**; ныне он доктор сельскохозяйственных наук, профессор, академик Российской академии наук, научный руководитель ФНЦ «ВНИТИП» РАН. Основными задачами Западно-Сибирской ЗОСП являлись организация и ведение селекционной работы по созданию яичных и мясных кроссов кур; обеспечение племенной продукцией хозяйств региона; создание ветеринарно-санитарного и эпизоотического благополучия; разработка рецептуры полноценных комбикормов и кормовых добавок; совершенствование технологии производства для племенных и промышленных хозяйств с учетом условий Западной и Восточной Сибири; пропаганда и внедрение передового опыта путем проведения конференций, семинаров, повышения квалификации.

В 2000 году приказом Российской академии сельскохозяйственных наук от 06.05.2000 г. № 32 на базе Западно-Сибирской ЗОСП были созданы Государственное научное учреждение «Сибирский научно-исследовательский институт птицеводства» РАСХН и организация научного обслуживания «Экспериментальное племенное хозяйство СибНИИП МНТЦ «Племптица» РАСХН. За годы их существования были созданы два яичных кросса кур «Омский белый» и «Омский белый аутосексный», три мясных – «Сибиряк», «Сибиряк 2С», «Сибиряк 2Т»; всего 16 исходных линий, 8 родительских форм и 5 финальных гибридов. В 2019 году в Государственном реестре селекционных достижений, допущенных к использованию, зарегистрирована порода перепелов Омская, первая созданная на постсоветском пространстве. К созданным кроссам и породе разработаны системы кормления, адаптированные к кормовой базе регионов Сибири, Дальнего Востока и республик Средней Азии. Разработан комплекс ветеринарных мероприятий для защиты птицы, усовершенствованы технологии её содержания и инкубации.

Рассматривая этапы развития сибирской аграрной науки, следует отметить, что наиболее активное развитие происходило в 70-80-е годы XX столетия. В это время при поддержке государства, местной (региональной) власти шло активное строительство зданий, сооружений, лабораторных корпусов, тепличного комплекса; лаборатории оснащались новым оборудованием, приборами, полевые лаборатории современными тракторами, комбайнами, сеялками, микрополевой техникой для закладки и проведения полевых опытов на самом высоком научно-методическом уровне; для сотрудников института строилось жилье. Если говорить образным языком, это было время развития и расцвета, как аграрной науки, так и сельского хозяйства в целом. Большое внимание аграрной науке и производству уделял **С.И. Манякин**, руководивший в то время Омской областью

Новым этапом в истории аграрной науки Омского Прииртышья стала реализация в 2018 году интеграционного проекта по созданию на базе Сибирского исследовательского института сельского хозяйства ФГБНУ «Омский аграрный научный центр» (Омский АНЦ), с присоединением к нему в статусе отдела ветеринарии Всероссийского научно-исследовательского института бруцеллеза и туберкулеза животных и в качестве филиала Сибирского научно-исследовательского института птицеводства. Основной целью создания такого центра являлось объединение научного и административного потенциала трёх учреждений для повышения эффективности научных исследований и усиления инновационной деятельности, направленных на дальнейшее развитие агропромышленного комплекса региона.

Структура Омского АНЦ в современном виде представлена селекционно-семеноводческим и агротехнологическими центрами, отделом ветеринарии и животноводства, а также филиалами: НИИ птицеводства, НПХ «Омское», «Боевое», «Новоуральское», Омский экспериментальный завод. Площадь сельскохозяйственных угодий выросла с 1 до 61 тыс. га. За прошедшие годы объём

финансирования Омского АНЦ растёт, в том числе за счёт ускоренного роста поступлений из внебюджетных источников.

Прошедшая пятилетка характеризуется не только изменениями рыночного спроса на товарную продукцию, но и улучшением качественных показателей высеваемых семян сельскохозяйственных растений практически по всем группам культур. Иностранные компании начали активно продвигать на российский рынок свои селекционные достижения, испытывая сорта и гибриды на территории Российской Федерации в целях внесения сведений о них в Государственный реестр. Импортозамещения невозможно достичь, просто воздвигнув барьеры для внешних игроков. Это гораздо более глубокий процесс адаптации отечественной селекции к реальным потребностям нашего рынка. Требуется срочная синхронизация работ учёных и аграриев, исходя из реальных потребностей рынка.

Анализ обеспеченности сортами местной селекции свидетельствует о самодостаточности региона по большинству зерновых, зернобобовых и кормовых культур; проблемы есть по картофелю. В целом по России общеизвестны сложности с обеспеченностью отечественными семенами кукурузы, сои, ярового рапса, подсолнечника, картофеля и сахарной свёклы. Для решения накопившихся проблем за минувшие годы Министерством образования и науки проводится масштабная работа по созданию и развитию селекционно-семеноводческих центров, в том числе Омском АНЦ, ФАНЦА, Красноярском НИИСХ, по картофелю – СФНЦА РАН.

В Омском АНЦ за счёт федерального бюджета и собственных средств в последние годы обновлён парк техники для семеноводства на 430 млн рублей. За счёт грантов на развитие селекционно-семеноводческих центров и «Хлеба России» проводится обновление, как селекционной техники, так и оборудования лабораторий. В целом за четыре года приобретено более 150 единиц лабораторного оборудования.

В результате ускорения и углубления селекционного процесса создаются адаптивные сорта, устойчивые к болезням, вредителям, полеганию и засухе, например, пшеница мягкая яровая «Сигма-5». Ведётся работа по созданию низкостебельных сортов зерновых интенсивного типа. Площадь, занимаемая сортами омской селекции – более 10 млн га, в том числе почти половина – в Республике Казахстан.

Опытно-экспериментальная база Омского АНЦ по направлению «Земледелие, плодородие почв» базируется на стационарах с многовариантными опытами, имеющими большую историю – 20–30 лет и более. Подобные экспериментальные полигоны расположены в трёх почвенно-климатических зонах Омской области: северная (подтаёжная, отдел северного земледелия, г. Тара), южно-лесостепная (опытные поля, г. Омск) и степная (опорный пункт семеноводства в степной зоне, пос. Новоуральский Таврического района). На основе полученных экспериментальных полевых и лабораторных данных совершенствуются агротехнологии выращивания зерновых, зернобобовых, кормовых, масличных культур, картофеля. Пять стационаров внесены в реестр Всероссийской Географической сети опытов, им присвоен статус «Достояние Российской сельскохозяйственной науки».

Научно-исследовательская работа по растениеводству (селекция и семеноводство) ведётся по 14 культурам (пшеница яровая мягкая и яровая твёрдая; озимые – пшеница, рожь, тритикале; яровые овёс и ячмень; горох посевной, соя, чечевица, люцерна посевная, костреч безостый, донник, картофель) в специальных селекционных севооборотах во всех трёх почвенно-климатических зонах.

На ускорение и повышение результативности селекционного процесса направлена работа лабораторий иммунитета растений, физиологии и биохимии, качества зерна; открывшейся в 2020 году лаборатории молекулярно-генетических исследований, оснащённой современным оборудованием мирового уровня. В настоящее время в отделе картофеля организована новая молодёжная лаборатория – репродуктивной биотехнологии.

Исследования, проводимые по направлениям ветеринарии, зоотехнии, птицеводства также базируются на современной приборной базе с использованием подопытных животных вивария, который в настоящее время готовится к реконструкции.

Кадровый потенциал научного центра с филиалами – около 800 человек. Число научных сотрудников – 113 человек, из них: 7 докторов наук, 68 кандидатов наук. Средний возраст исследователей составляет 44,5 года. Численность научных сотрудников в возрасте до 39 лет – 40 человек. С 2019 года коллективом руководит кандидат технических наук, доцент, Почётный работник АПК РФ **Максим Сергеевич Чекусов**. Успешно продолжают научные исследования по важнейшим направлениям деятельности АПК региона: земледелию и кормопроизводству, селекции и

семеноводству, животноводству и ветеринарии, птицеводству, механизации и экономики, активно проводится инновационная деятельность (Сибирский научно-исследовательский..., 2023).

За период 2018–2022 гг. сотрудниками Центра получено 87 патентов, в том числе около 58 на селекционные достижения РФ, из них 27 – в республике Казахстан; 16 патентов на изобретения, 3 полезных модели, 10 свидетельств программ для работы на ЭВМ. Только в 2018 году получено 16 патентов на селекционные достижения РФ и 11 патентов на СД в Казахстане. В 2022 году сотрудниками центра опубликовано 5 монографий, 120 статей в рецензируемых журналах, из них в ядре РИНЦ – 97. Ежегодно осуществляется семеноводство по 30–35 сортам в отделах семеноводства института, степного и северного земледелия.

Для реализации высокого биологического потенциала создаваемых сортов подразделения агротехнологического центра создали и совершенствуют систему земледелия нового поколения, представляющую интегрированную систему управления продуктивностью агроценозов. Сорт без технологии, обеспечивающей урожайность и качественные параметры, не интересен аграриям, им нужен гарантированный результат (Система адаптивного земледелия..., 2020).

С целью ускоренного развития агропромышленного сектора региона, через освоение достижений научно-технического потенциала, в настоящее время наиболее важным является формирование инновационной системы. Её главная задача – интегрировать аграрную науку и реальный сектор производства, предлагать современные научные идеи, новые технологии, методы управления, продвигать на рынок новые сорта растений и породы животных, современные сельскохозяйственные машины. Поистине неисчерпаем научный потенциал, накопленный несколькими поколениями учёных Омского научного центра за многие десятилетия. Мы уверены, что сохраним и продолжим славные традиции, заложенные предыдущими поколениями учёных, и впредь будем достойно и активно развивать аграрную науку Сибири и её агропромышленный комплекс. Выполнение поставленных задач в полном объёме возможно при продолжении и усилении поддержки научных и образовательных учреждений по различным направлениям. Это будут вложения в настоящее и будущее регионов и в целом России.

ЛИТЕРАТУРА

Аграрная наука Сибири XXI века: материалы совместного выездного заседания президиумов РАСХН и СО РАСХН, посвященного 175-летию сибирской аграрной науки (Омск, 24–26 июня 2003 г.). Новосибирск: СО РАСХН, 2004. 247 с.

Вараксин А.В., Катин-Ярцев Л.В. Омский опытный хутор – начало сибирской сельскохозяйственной науки. Омск: Омское книжное издательство, 1986. 86 с.

Достижения сибирских опытных учреждений / Под общей редакцией И.М. Жуйкова. Новосибирск: Сибкрайиздат, 1929. С. 5–114.

Научный отчет Сибирского научно-исследовательского института зернового хозяйства за 1941–1942 гг. Отдел Сельхозиздат, 1946. 128 с.

Селекционно-семеноводческий центр (ретроспектива, настоящее, будущее) / Составители: П.Н. Николаев, О.А. Юсова, И.А. Белан, В.С. Юсов, А.М. Асанов, Р.И. Рутц, М.Г. Евдокимов, Л.В. Омелянюк, П.В. Поползухин, Л.П. Росеева, А.А. Гайдар, А.И. Черемисин, Н.В. Дергачева, С.В. Васюкевич, Л.В. Мешкова, И.В. Пахотина, М.Е. Мухордова, А.В. Журавлева, В.В. Шепелев, А.Н. Ковтуненко, Ю.Ю. Паршуткин. Омск: Издательство ИП Макшеевой Е.А., 2020. 222 с.

Сибирская сельскохозяйственная наука за 50 лет: Научные труды № 13. Омск, 1968. 274 с.

Сибирский научно-исследовательский институт сельского хозяйства (СибНИИСХ). История учреждения в документах и фотографиях / под общей редакцией М.С. Чекусова. Омск: ФГБНУ «Омский АНЦ», 2023. 58 с.

Система адаптивного земледелия Омской области. ФГБНУ «Омский АНЦ». Омск: Издательство ИП Макшеевой Е.А., 2020. 522 с.

Хлеб Прииртышья. Омск: Книжное издательство, 1999. 399 с.

Храмцов И.Ф., Кошелев Б.С. Развитие сельскохозяйственной науки в Омском регионе. Омск: ФГБНУ СибНИИСХ, ФГБОУ ВПО ОмГАУ им. П.А. Столыпина, Изд-во ЛИТЕРА, 2015. 588 с.

Яхтенфельд П.А. 125 лет сельскохозяйственного опытного дела в Сибири. Москва: Сельхозгиз, 1954. С. 77–79.

Поступила в редакцию 20.03.2024

Принята 22.03.2024

Опубликована 23.03.2024

Сведения об авторах:

Чекусов Максим Сергеевич – кандидат технических наук, доцент, директор ФГБНУ «Омский аграрный научный центр» (Омск, Россия); mchekusov@anc55.ru

Бойко Василий Сергеевич – доктор сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник, заместитель директора по научной работе ФГБНУ «Омский аграрный научный центр» (Омск, Россия); boicko.vasily2011@yandex.ru

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи



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

Past, present and future of agricultural science in the Omsk Near-Irtysh region

© 2024 M. S. Chekusov , V. S. Boyko 

Omsk Agrarian Research Center, Korolev Avenue, 26, Omsk, Russia. E-mail: mchekusov@anc55.ru, boicko.vasily2011@yandex.ru

The article examines the historical path of Siberian agricultural science in the Omsk region. The bicentennial anniversary of the Omsk region historically coincides with the development of agricultural science in the region. The article describes briefly the stages of agricultural science in the region, starting with the establishment of an experimental farm in the 19th century and then continuing in 1933 with the Siberian Research Institute of Grain Farming, followed in 1956 by the Siberian Research Institute of Agriculture and in 2018 by the integration project establishing the Omsk Agrarian Research Center, uniting agricultural research organizations of the region.

Keywords: *agricultural science; history of organization; Siberian agriculture; animal husbandry; veterinary medicine.*

How to cite: *Chekusov M.S., Boyko V.S. Past, present and future of agricultural science in the Omsk Near-Irtysh region. The Journal of Soils and Environment. 2024. 7(1). e257 (in Russian with English abstract). DOI: [10.31251/pos.v7i1.257](https://doi.org/10.31251/pos.v7i1.257)*

REFERENCES

Agrarian science of Siberia of the XXI century: materials of the joint field meeting of the Presidiums of the Russian Academy of Agricultural Sciences and the Siberian Branch of the Russian Academy of Agricultural Sciences, dedicated to the 175th anniversary of Siberian agrarian science (Omsk, June 24–26, 2003). Novosibirsk: Siberian Branch of the Russian Academy of Agricultural Sciences, 2004. 247 p. (in Russian).

Varaksin A.V., Katin-Yartsev L.V. Omsk experimental farm – the beginning of Siberian agricultural science. Omsk: Omsk book publishing house, 1986. 86 p. (in Russian).

Achievements of Siberian experimental institutions / I.M. Zhuikov (ed.). Novosibirsk: Sibkraiizdat, 1929. P. 5–114. (in Russian).

Scientific report of the Siberian Research Institute of Grain Farming for 1941–1942. Selkhozikhdat Publ., 1946. 128 p. (in Russian).

Breeding and Seed Center (retrospective, present, future) / Compilers: P.N. Nikolaev, O.A. Yusova, I.A. Belan, V.S. Yusov, A.M. Asanov, R.I. Rutz, M.G. Evdokimov, L.V. Omelyanyuk, P.V. Popolzukhin, L.P. Roseeva, A.A. Gaidar, A.I. Cheremisin, N.V. Dergacheva, S.V. Vasyukevich, L.V. Meshkova, I.V. Pakhotina, M.E. Mukhordova, A.V. Zhuravleva, V.V. Shepelev, A.N. Kovtunenکو, Y.Y. Parshutkin. Omsk: Maksheeva E.A. Publishing House, 2020. 222 p. (in Russian).

Siberian agricultural science for 50 years: Scientific Proceedings No. 13. Omsk, 1968. 274 p. (in Russian).

Siberian Research Institute of Agriculture (SibNIISKh). History of the institution in documents and photographs / M.S. Chekusov (ed.). Omsk: Omsk Agrarian Research Center Publ., 2023. 58 p. (in Russian).

The system of adaptive farming in the Omsk region. Omsk Agrarian Research Center. Omsk: Maksheeva E.A. Publishing House, 2020. 522 p. (in Russian).

Bread of Priirtyshya. Omsk: Book Publishing House, 1999. 399 p. (in Russian).

Khramtsov I.F., Koshelev B.S. Development of agricultural science in the Omsk region. Omsk: SibNIISKh, Omsk SAU named after P.A. Stolypin, LITERA Publishing House, 2015. 588 p. (in Russian).

Yachtenfeld P.A. 125 years of agricultural experimental work in Siberia. Moscow: Selkhozgiz, 1954. P. 77–79. (in Russian).

Received 20.03.2024

Accepted 22.03.2024

Published 23.03.2024

About the authors:

Maxim S. Chekusov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Director of Omsk Agrarian Research Center (Omsk, Russia); mchekusov@anc55.ru

Vasily S. Boyko – Doctor of Agricultural Sciences, Senior Researcher, Deputy Director for Scientific Work of Omsk Agrarian Research Center (Omsk, Russia); boicko.vasily2011@yandex.ru

The authors read and approved the final manuscript



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